

陈维江, 石海峰, 李春阳, 等. 引江补汉工程段中分层减压控制闸布置与体型研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1126-1133. CHEN W J, SHI H F, LI C Y, et al. Layout and shape of layered pressure reducing control gate in the middle segment of the Yangtze-to-Hanjiang River Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1126-1133. (in Chinese)

# 引江补汉工程段中分层减压控制闸布置与体型研究

陈维江<sup>1</sup>, 石海峰<sup>1</sup>, 李春阳<sup>1</sup>, 姜治兵<sup>2</sup>, 左丽<sup>1</sup>, 任坤杰<sup>2</sup>, 杨青远<sup>2</sup>

(1. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036; 2. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010)

**摘要:**引江补汉工程段中控制方案将控制闸设置在 164 km 处, 以避免局部段内压过高的问题, 主要从水动力特性的角度论证洞线总体布置及控制闸布置与体型的合理性。采用一、三维数学模型与物理模型相结合的复合模型开展相关研究: 一维水锤数学模型用于闸门启闭过程的全线水力过渡过程分析, 通过优化计算, 得到相对较优的闸门启闭过程, 同时为控制闸段的三维数模与物理模型提供边界条件; 三维水气两相流数学模型与物理模型模拟分析闸室与调流池流态与水面波动、中孔溢流面压力分布等水力指标, 同时为一维数学模型提供控制闸泄流能力曲线。结果表明: 当控制中孔弧形门以先慢后快的三阶段变速率过程开启时, 可将全线的最大水锤压力压值在规程允许范围内; 中孔溢流面压力分布正常, 调流池内水体消能充分, 下有压洞进口前沿水面波动较小, 未见吸气旋涡等不利流态。引江补汉工程工程采用段中分层减压控制的总体方案是可行的, 控制闸布置与体型合理, 研究方法可供类似工程参考。

**关键词:**引江补汉; 减压控制闸; 复合模型; 过渡过程; 水力特性

**中图分类号:** TV68    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0110

引江补汉工程主要任务是从长江三峡库区引水入汉江, 提高汉江流域的水资源调配能力, 增加南水北调中线工程北调水量, 提升中线工程供水保障能力, 并为引汉济渭工程达到远期调水规模、向工程输水线路沿线地区城乡生活和工业补水创造条件。

引江补汉工程采用有压输水方式, 具有水头高、流量大、距离长、径长比超小等特点, 又由于工程出口 30 km 洞段埋深较浅, 为降低浅埋洞段内压过高而增大爆管的风险, 采用了段中控制闸方案, 因此, 工程除了面临长距离有压输水隧洞共有的水锤问题外, 还面临高水头条件下闸门启闭及启闭过程中孔流-堰流-孔流的流态复杂转换<sup>[1-7]</sup>问题。为了避免高水头下闸门淹没出流产生流激振动导致闸门破坏, 引江补汉工程创新性地在线段中控制闸的布置中采用了设置中底、底孔分层减压的策略。

通过经济有效的水力调控将水击压力控制在允许范围内, 同时保证控制闸自身的安全运行, 是引江补汉工程需解决的首要任务。目前模拟长距离管道瞬变流过程大多采用一维水锤模型, 水锤模型

的控制方案一般采用特征线法进行求解<sup>[8-23]</sup>。针对引江补汉工程的水锤问题, 一维水锤模型计算量较小, 可较为快捷地模拟过渡过程中有压隧洞内压力的变化, 但无法反映弧门孔口准确流量与闸后复杂的流态及其演变, 因此其模拟得到的隧洞内的压力结果精度有限; 三维水动力模型可全面涵盖上述现象, 但囿于计算量过大不具备可行性<sup>[24-28]</sup>。为准确模拟系统启闭和流量调节过渡过程的动态特性以及控制段的水力衔接现象, 不同于以往的研究方法, 本文构建了全系统的一维和控制闸段三维数模与物理模型相结合的复合模型开展相关研究, 从水动力特性的角度论证洞线总体布置及控制闸布置与体型的合理性。

## 1 工程概况

引江补汉工程从三峡库区龙潭溪自流引水至丹江口水库坝下的汉江干流, 采用有压自流输水方式, 进口位于三峡大坝上游约 7.5 km 处, 出口位于丹江口大坝下游约 5 km 处, 输水线路总长约 194.7 km,

收稿日期: 2023-09-27    修回日期: 2023-11-24    网络出版时间: 2023-12-01

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231130.1635.006>

作者简介: 陈维江(1974—), 男, 山东莒县人, 高级工程师, 博士, 主要从事南水北调工程科技管理研究。E-mail: [chenweijiang@nsbd.cn](mailto:chenweijiang@nsbd.cn)

其中,输水隧洞长约 194.2 km,等效过水洞径 10.2 m,输水流量随三峡库水位变化为 170~212 m<sup>3</sup>/s。多年平均调水量 39 亿 m<sup>3</sup>。工程建设项目包括输水工程和汉江影响河段综合整治工程两部分<sup>[29]</sup>。

受地形条件限制,输水隧洞沿线最大埋深 1700 m,最小埋深位于出口 30 km 输水管段。若采用尾部控制方案,则管线充水完成后或尾阀关闭后,沿程输水管段内作用压力最大可达 90 m 水柱,浅埋段爆管风险较大,段中控制方案将控制闸设置在 164 km 处可解决浅埋段内压过高的问题,减免爆管风险。控制闸为地下结构,长 255.7 m,顺水流向依次包括溢流调压井兼工作门井、中孔和底孔、消力池段、检修门井。

引江补汉工程为长距离大流量有压输水隧洞,控制闸门启闭速率过快会产生较大的水锤波,导致隧洞衬砌破坏,因此输水系统启闭时要求控制闸门缓慢启闭,闸门必然在较长时间段处于局部开启状态。无论平板门还是弧形门,在局部开启时,要尽量减轻激振带来的危害,且都不宜长时间处于淹没出流状态,以避免门后旋滚击打门体和支臂的情况。

因此现阶段推荐的控制闸采用双层闸门控制方案:上层为中孔,底高程 104 m,布置单孔弧形工作门,孔口尺寸 6 m×9 m(宽×高),启闭过程中均为自由出流流态;下层为底孔,底高程 65 m,布置两扇平面工作门,矩形断面,单孔尺寸 4 m×10 m(宽×高)。闸前设溢流式调压井,井底高程 65 m,井顶高程 200 m,溢流高程 198 m。底孔和中孔均向后连通至消力池,消力池断面型式为城门洞型。

输水系统开启时,先缓慢开启中孔弧形工作门,以避免产生过大的水锤压力,弧门全开后,输水流量基本接近设计流量,而平板门前后水头亦减小至 15 m 左右,此时再按常规速度同步开启底孔两扇平面工作门,底孔平板门开启过程引起的流量变化较小,不会导致较大的水锤压力。系统关闭时,先同步关闭底孔两扇平面门,再缓慢关闭中孔弧形门。

为了在控制水锤压力的同时缩短闸门总启闭时长,需开展水力过渡过程分析,以得到相对较优的闸门启闭过程。此外在控制闸段,水流需经历有压-无压-有压的流态转变,控制闸总体布置、体型的合理性及消力池的消能与整流效果亦需论证与优化。

## 2 数学模型与物理模型

采用一维水锤数学模型开展闸门启闭过程的水

力过渡过程分析,采用三维水气两相流数学模型与比尺为 1:25 水工整体模型相结合的手段开展控制闸段的布置与体型研究。

### 2.1 过渡过程一维数学模型

有压管道瞬变流基本方程为运动方程和连续性方程,表达式为

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - V \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

式中:  $V$  为平均速度, m/s;  $H$  为测压管水头, m;  $D$  为管道直径, m;  $x$  为沿管轴线的距离,向下游为正, m;  $t$  为时间, s;  $\alpha$  为管轴线与水平面的夹角,纵坡上升为正, ( $^\circ$ );  $a$  为水锤波速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $f$  为达西-魏斯巴赫摩擦因数。

水锤数学模型采用特征线法求解。

### 2.2 三维水气两相流数学模型

控制方程与求解方法如下。

连续方程为

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

动量方程为

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4)$$

$k$  方程为

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + C_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$\varepsilon$  方程为

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中:  $u_i$ 、 $u_j$ 、 $x_i$ 、 $x_j$  分别为速度分量与坐标分量;  $\mu$ 、 $\mu_t$  分别为动力黏性系数与紊流黏性系数, m<sup>2</sup>/s;  $\mu_t = C_u \rho k^2 / \varepsilon$ ;  $p$  为压力, Pa;  $f_i$  为质量力, N;  $C_k$  为平均速度梯度产生的紊动能项,  $C_k = \mu_t \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]$ ; 经验常数  $C_u = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。

水气两相交界面追踪采用 VOF 模型。令函数  $\alpha_w(x, y, z, t)$  与  $\alpha_a(x, y, z, t)$  分别代表控制体积内水、气所占的体积分数。在每个单元中,水、气体积分数之和为 1, 即:

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (7)$$

对于单个控制体积,存在 3 种情况: $\alpha_w = 1$ 表示该单元完全被水充满; $\alpha_w = 0$ 表示该单元完全被气充满; $0 < \alpha_w < 1$ 表示该单元部分为水,部分为气,并且存在水、气交接面。计算出各单元的 $\alpha_w$ 值及梯度之后,就可以确定各单元中自由边界的近似位置。

水的体积分数 $\alpha_w$ 的控制方程为

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

式中变量含义同上,水气界面的跟踪通过求解该连续方程完成。三维水气两相流数学模型采用有限体积法求解。

模拟范围与网格划分。控制闸模拟范围包括部分上游主管、溢流调压井、中孔与底孔、消力池及部分下游有压管。控制闸模拟范围详见图 1。计算区域采用计算精度与效率均较高的六面体结构化网格划分。沿水流方向网格尺度 0.3~0.8 m,水深方向网格尺度 0.3 m,垂直水流方向 0.3 m,网格总数约 320 万个。

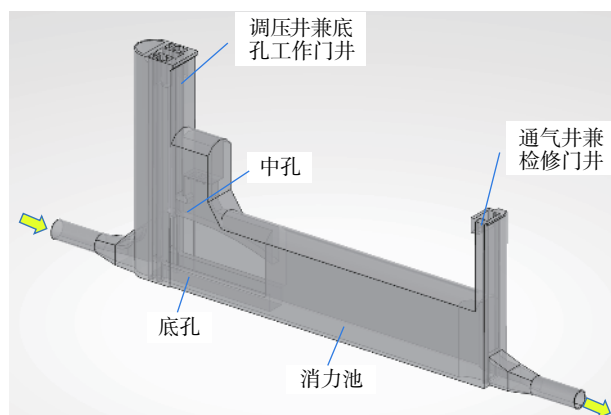


图 1 段中控制闸数学模型模拟范围

Fig. 1 Simulation range of the mathematical model of the control gate

控制闸入流隧洞处给定流量作为边界条件,出流隧洞处给定压力作为边界条件,各门井处给定大气压力作为边界条件。

### 2.3 物理模型

物理模型按照重力相似准则设计成正态模型,比尺 $L_r=25$ ,模拟范围与三维数学模型相同(见图 1),全长约为 440 m。模型采用有机玻璃制作。有机玻璃糙率约为 0.008 0,换算至原型则糙率为 0.013 7,与混凝土管及建筑物过流面糙率 0.014 0 接近,模型糙率可满足试验研究的需要。

### 2.4 研究思路

首先采用三维水气两相流数学模型与物理模型测试段中控制闸在不同水位与开度下的泄流能力,

为一维水锤数学模型提供准确的内部动态边界条件;然后采用水锤模型进行闸门启闭过程的全线水力过渡过程分析,通过优化计算,得到相对较优的闸门启闭过程,同时为三维数模与物理模型模拟分析典型时刻控制闸段的水力特性提取边界条件;最后采用三维数模与物理模型模拟分析闸室与调流池流态与水面波动、中孔溢流面压力分布等水力指标,三维数学模型进行设计方案的合理性的初步评价与必要的优化,物理模型对优化后的方案进行进一步的验证。

## 3 过渡过程分析

中孔弧形门流量开度曲线为高度非线性,10%开度可下泄约 80% 的输水流量,20%开度可下泄约 90% 输水流量,因此输水隧洞的水力过渡过程主要由中孔弧形门的启闭时间和启闭规律决定。

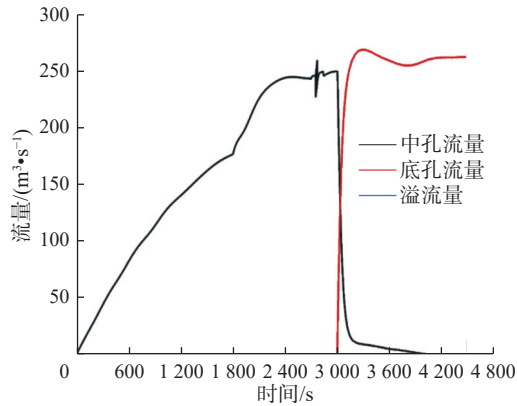
为降低输水流量变率控制水锤压力,同时缩短控制闸的总启闭时间,通过大量试算,得到相对较优的闸门启闭过程,弧门启闭可优化为三阶段变速率过程:0~20%的弧门开度采用 0.06 m/min 的开启速度,20%~60%的弧门开度采用 0.24 m/min 的开启速度,60%~100%的弧门开度采用 0.72 m/min 的开启速度;底孔平面门启闭按正常速度 1.00 m/min 控制。在此控制策略下,隧洞沿线最大水锤压力满足“不大于 1.3 倍最大工作压力”要求。

启门过程。在上游 173.3 m 水位条件下,按上述弧门控制策略启门,中孔与底孔流量过程、闸前后水位过程及隧洞全线压力包络线见图 2。启门时,弧门的最大操作水头达 69.3 m,10 min 后门前压力水头降低 50 m 左右,再 15 min 后门前压力水头降低至 30 m 左右,随着弧门开度加大,门前压力水头进一步下降,直至 50 min 弧门完全打开后,再 10 min 开启底孔平面工作门。平面工作门的最大启门水头不超过 15 m。通过隧洞水力过渡过程计算可知,由于闸后 30 km 隧洞水体的惯性,在启门过程中,闸后消力池水位会上升,最高水位达 104.21 m,中孔堰顶高程 104.0 m,故弧门开启过程中门后保持自由出流,不会出现门后旋滚击打门体和支臂的情况。

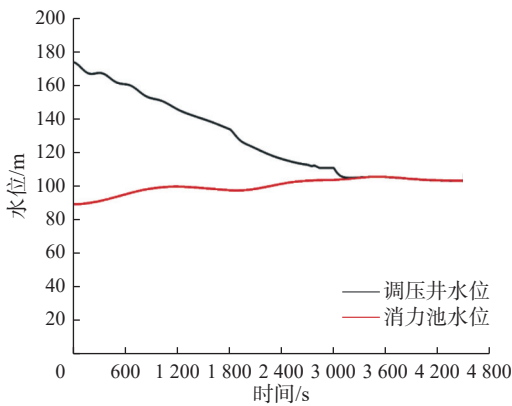
闭门过程。在上游 173.30 m 水位条件下,按上述弧门控制策略闭门,中孔与底孔流量过程、闸前后水位过程及隧洞全线压力包络线见图 3。闭门时,先 10 min 关闭底孔平面工作门,平面工作门的最大闭门水头不超过 15 m,然后关闭中孔弧门,20 min 后门前压力水头升高至 30 m 左右,再 15 min 后门



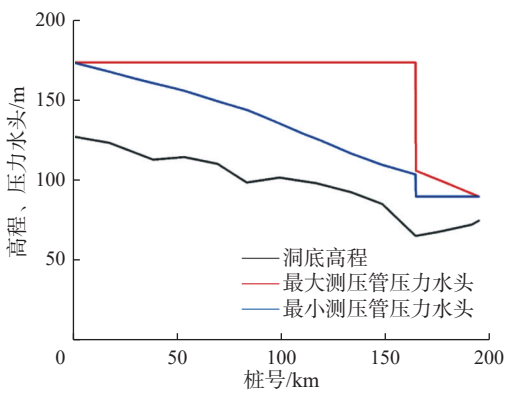
前压力水头升高至 50 m 左右, 10 min 后升高至 70 m 左右, 再过 5 min 弧门完全关闭时门前压力达 86 m 左右, 弧门关闭后门前压力升至最高, 达 196.29 m 水位, 弧门挡水的最大水头为 92.29 m。



(a) 中孔底孔流量过程



(b) 闸前后水位过程



(c) 隧洞全线最大最小压力

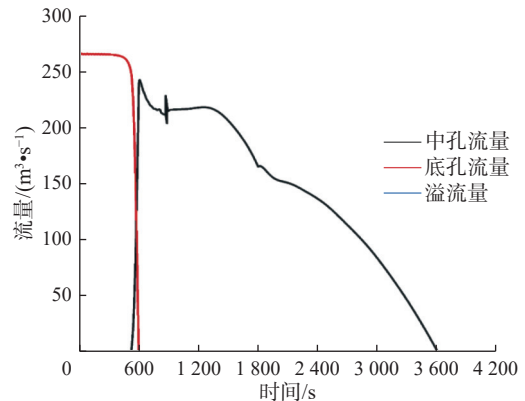
图 2 高水位启门水位、流量过程与全线压力

Fig. 2 Water level process, flow-rate process and overall pressure diagram in opening process under high water level

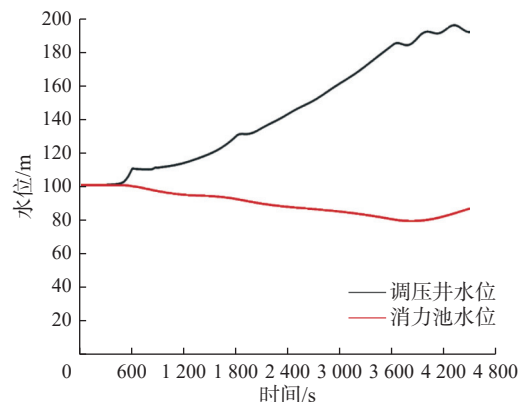
在闭门过程中, 闸后消力池水位会下降, 最低水位达 81.41 m。

闸门运行条件分析。从以上分析可知, 中孔弧形工作门最大操作水头达 86 m, 门后为自由出流。弧形门启闭时间长达 50 min, 但高水头下的操作时

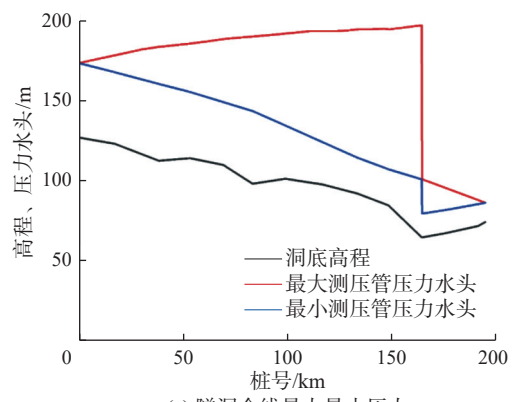
间不长, 门前压力大于 30 m 的操作时间 25~30 min, 其中大于 50 m 的操作时间 10~15 min。



(a) 中孔底孔流量过程



(b) 闸前后水位过程



(c) 隧洞全线最大最小压力

图 3 高水位闭门水位、流量过程与全线压力

Fig. 3 Water level process, flow-rate process and overall pressure diagram in closing process under high water level

底孔平面门在淹没状态下启闭, 最大启闭水头差不大于 15 m, 启闭时间 10 min。根据以往的水工闸门设计经验, 底孔平面门的运行条件较好, 一般不会出现闸门振动危害。

#### 4 控制闸水力特性分析

启门过程中, 输水管道全线及控制闸段水力参数均在不断变化, 为了便于分析控制闸段的水力特

性,选取启门过程中的若干开度,采用三维水气两相流数学模型与物理模型开展稳态模拟试验,对控制闸布置与体型等进行分析与评价。共进行了中孔弧形门闭门开度 8 m、4 m、1 m 与启门开度 8 m、4 m、1 m 的 6 组稳态模拟试验,由于启门不同开度的 3 组试验与对应开度闭门工况控制闸段的水力特性差别不大,篇幅所限,本文仅给出闭门工况的试

验研究结果。

#### 4.1 流态与流速分布

中孔弧门关闭至开度 8 m(堰流,过流量 239.89 m<sup>3</sup>/s,相应下游水位 98.49 m)、4 m(孔流,过流量 227.15 m<sup>3</sup>/s,相应下游水位 96.81 m)、1 m(孔流,过流量 121.27 m<sup>3</sup>/s,相应下游水位 87.21 m),控制段流态与流速分布见图 4。

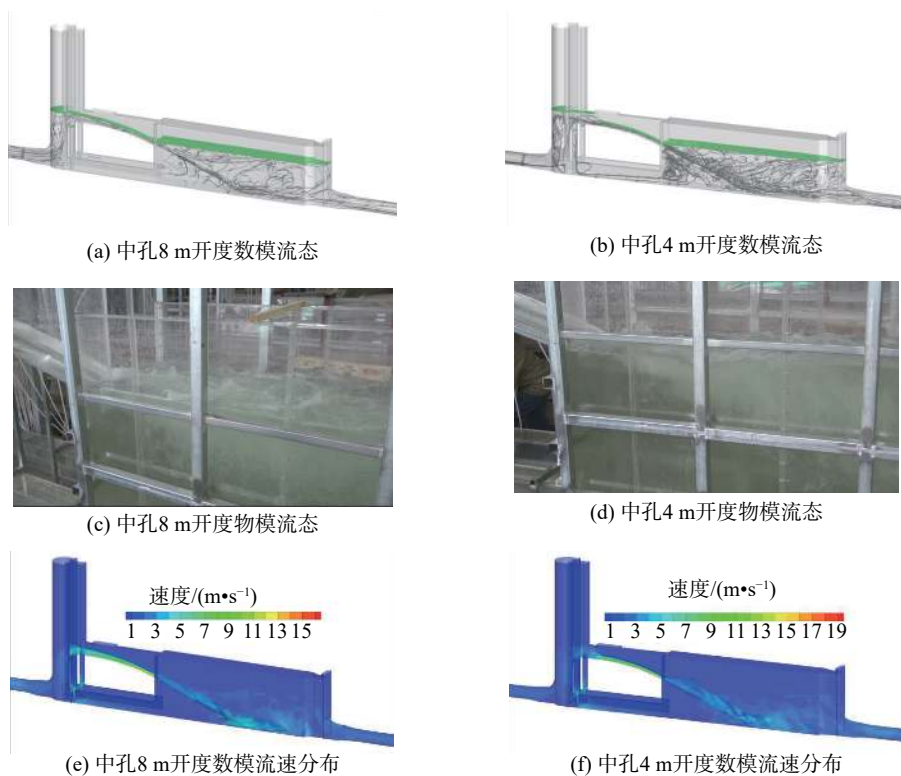


图 4 控制段流态与流速分布

Fig. 4 Flow pattern and velocity distribution in the control section

流态。各开度下,水流以堰流或孔流出中孔后经溢流面入射下游消力池,形成较为典型的斜向淹没射流流态,在入射水体的上下游形成旋滚,消力池内水体紊动较为强烈,消能充分。水流入射消力池时在界面处卷入空气随流下潜,同时在旋滚作用下扩散。

中孔开度 8 m 时,入射水流的主流较为频繁触及消力池底部,主流沿底部潜行至消力池末端后进入闸后有压段,气泡在旋滚作用下扩散至消力池各处,未见气泡随流进入下游主洞;中孔开度 4 m 时,入射水流的主流偶尔触及消力池底部,随后沿底部进入下流主洞,水流夹携气泡扩散至消力池中下部,未见气泡随水流进入下游主洞;中孔开度 1 m 时,入射水流主流下潜至消力池水面以下至约 1/3 水深处,主流在消力池上部行进,消力池下部为大范围回流,主流行至消力池末端后下潜进入闸后有压段,此工况下,未见水流夹携气泡随水流进入下游主洞。

下游有压管前端水面有约 1.6~2.0 m 幅度的震荡,稳流室水位较高时水面偶有游离性浅表旋涡,水位较低时水面偶见不吸气漏斗旋涡。

流速分布。水流经主洞进入调压井,过流面积增大,流速减小;过中孔弧形门进入溢流堰,堰面沿程水深减小,流速增大,至堰面末端区域流速达到最大;水流出堰面入射消力池水体,流速逐渐减小。中孔开度 8 m 时,上、下游主洞断面平均流速为 3.05 m/s,溢流堰面末端流速达 15.9 m/s;中孔开度 4 m,上、下游主洞断面平均流速为 2.89 m/s,溢流堰面末端流速达 17.9 m/s;中孔开度 1 m 时,上、下游主洞断面平均流速为 1.54 m/s,溢流堰面末端流速达 18.9 m/s。

#### 4.2 压力特性

中孔弧门关闭至开度 8 m(堰流)、4 m(孔流)、1 m(孔流),中孔堰面压力分布见图 5。

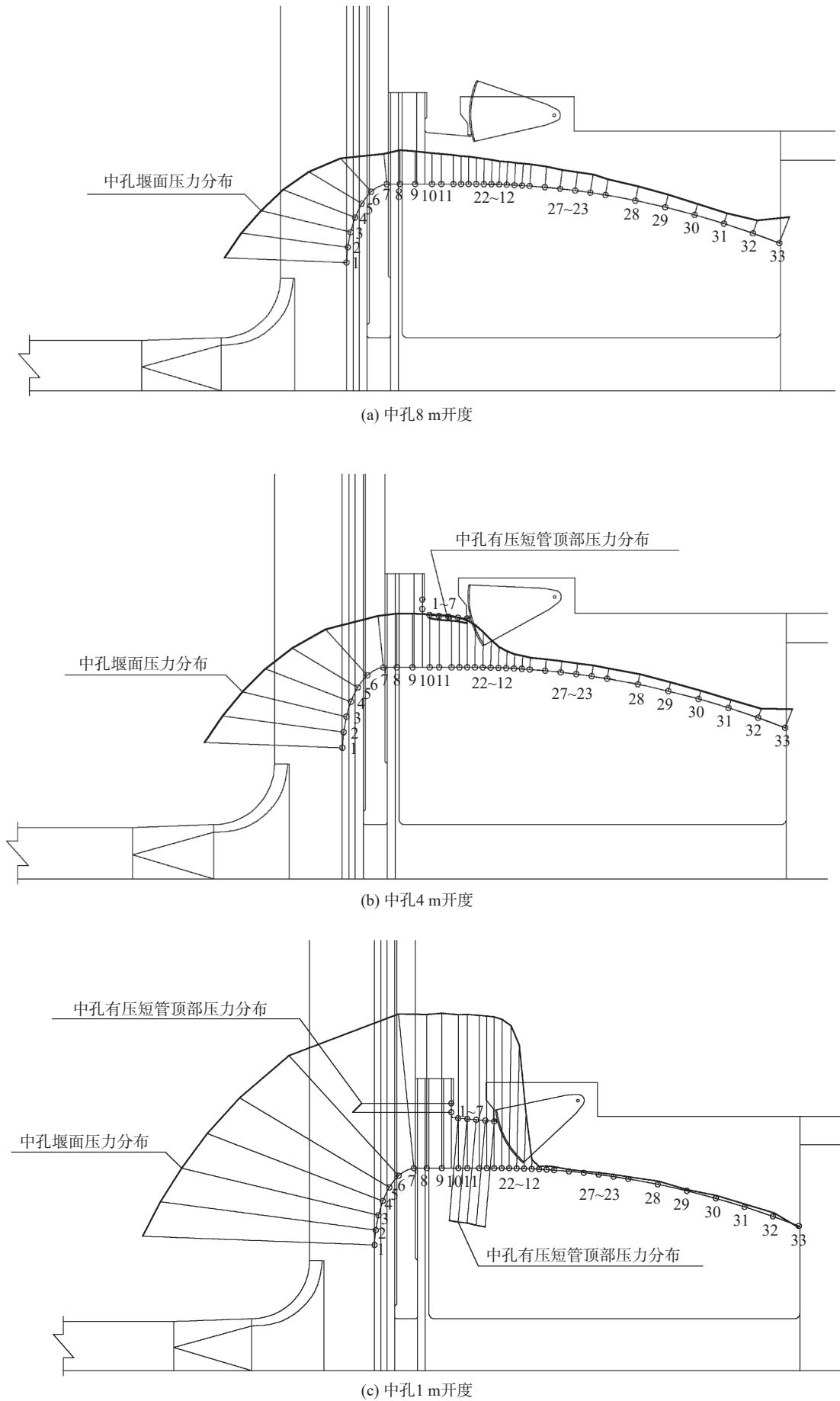


图5 堰面压力分布

Fig. 5 Weir surface pressure distribution diagram

中孔 8 m 开度时,中孔为堰流,堰面中心线上压力呈沿程降低趋势,变化平缓,无大的压力梯度,压力分布正常;中孔 4 m 开度时,中孔为孔流,弧形门前的堰面上压力比 8 m 开度时有所升高,过弧形门后,堰面压力比 8 m 开度时明显降底;中孔 1 m 开度时,中孔为孔流,弧形门前的堰面上压力比 4 m 开度时进一步升高,而弧形门后堰面压力比 4 m 开度时进一步降低,堰面末端出现小负压(0.27×9.81 kPa)。表明中孔体型设计较为合理。

稳流室底部压力分布均匀,未出现明显的压力峰值,表明入射下游的淹没射流未对稳流室底板产生冲击作用。下游有压管进口顶部压力分布正常,未监测到负压,表明下游有压管进口体型设计较为合理。

## 5 结论

引江补汉工程段中分层减压控制方案,中孔弧形门采用先慢后快的三阶段变速率控制策略,可在降低输水流量变率控制水锤压力的同时缩短控制闸的总启闭时间,隧洞沿线最大水锤压力满足“不大于 1.3 倍最大工作压力”要求。

中孔弧形门启闭过程中,水流以堰流或孔流出中孔后经溢流面入射下游消力池,形成较为典型的斜向淹没射流流态,消力池内水体消能充分,未见水流夹携气泡随水流进入下游主洞,下有压主洞前水面偶见不吸气漏斗旋涡,表明控制闸布置合理。控制闸各部位压力分布正常,表明控制闸各部位体型合理。

引江补汉工程采用段中分层减压控制的总体方案是可行的,控制闸布置与体型合理。采用一、三维数学模型与物理模型相结合的复合模型的研究方法可供类似工程参考。

### 参考文献:

- [1] 钮新强,万蕙,刘琪.引江补汉工程关键技术挑战[J].中国水利,2022(18):15-17.
- [2] 肖昌虎,李波,廖小永,等.引江补汉工程建设的必要性及重大意义[J].中国水利,2022(18):32-35.
- [3] 许继军,张晓琦,周涛,等.引江补汉工程实施后的南水北调中线水源工程可调水量分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(4):790-799.
- [4] 李波,魏凯,曹正浩,等.引江补汉工程水资源优化配置和工程规模论证[J].中国水利,2022(18):40-43.
- [5] 武松,韩健,袁葳,等.引江补汉工程超长深埋有压输水隧洞设计[J].中国水利,2022(18):48-50.
- [6] 王磊,蔺秋生,赵健.引江补汉工程总体布局论证概述[J].中国水利,2022(18):36-39.
- [7] 王吉亮,向家波,颜慧明,等.引江补汉工程输水线路工程地质选线研究[J].长江科学院院报,2023,40(5):100-105.
- [8] 杨开林.长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J].水利学报,2016,47(3):424-435.
- [9] 高媛媛,姚建文,陈桂芳,等.我国调水工程的现状与展望[J].中国水利,2018(4):49-51.
- [10] 郭伟奇,吴建华,李娜,等.长距离重力流输水系统水锤防护措施研究[J].中国农村水利水电,2018(11):124-126.
- [11] 王祺武,李志鹏,朱慈东,等.重力流输水管路阀门调节与水锤控制分析[J].流体机械,2020,48(6):38-43.
- [12] 罗浩,张健,蒋梦露,等.长距离高落差重力流供水工程的关阀水锤[J].南水北调与水利科技(中英文),2016,14(1):131-135.
- [13] 张景望,吴建华,高洁,等.长距离重力流输水系统水锤模拟及其防护研究[J].水电能源科学,2019,37(5):57-60.
- [14] 邓安利,蒋劲,兰刚,等.长距离输水工程停泵水锤的空气罐防护特性[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(3):402-406.
- [15] 张白云,王俊新,唐泽润,等.长距离输水泵站中空气罐进出口阻力系数对其水锤防护效果影响的研究[J].中国农村水利水电,2021(6):197-201.
- [16] 郑源,屈波,张健,等.有压输水管道系统含气水锤防护研究[J].水动力学研究与进展:A辑,2005,20(4):436-441.
- [17] 郑兴兴,张健,何喻,等.空气阀的水锤防护性能及其在联合防护中的应用[J].水电能源科学,2014,32(2):167-170.
- [18] 张文乐,田睿,王启国.输水隧洞水力过渡过程计算[J].水利规划与设计,2021(12):129-134.
- [19] 薛松,张石磊,李进平,等.超长重力流输水系统水锤防护的顶部联通溢流式调压塔方案研究[J].中国农村水利水电,2022(7):158-163.
- [20] 郑元伟.长距离输水管线水力过渡过程计算分析[J].水利科技与经济,2022,28(8):18-22.
- [21] 张正阳.基于末端闸门控制的长距离大管径供水管线水力过渡过程的研究[J].水科学与工程学报,

- 2022(1): 49-52.
- [22] 董航凯, 田睿, 王启国. 长距离输水管道水力过渡过程计算[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(8): 32-38.
- [23] 陈岚, 朱梅, 李琦, 等. 长距离有压隧洞引调水工程过渡过程研究[J]. 陕西水利, 2023(7): 5-8.
- [24] 严继松, 廖国玲. 有压管道充水过程水力特性三维数值模拟[J]. 水利水电技术, 2015, 46(3): 110-114.
- [25] 刘振英, 毛元静. 基于三维数值模拟分析输水工程取水头部水流特性[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(3): 18-22.
- [26] 杨振东, 施苏齐, 张巧玲, 等. 含泄漏及弯头三维输水管道内水锤波传播特性研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1588-1595.
- [27] 彭永勤, 彭涛. 船闸闸墙长廊道输水系统闸室三维流场数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 72-75.
- [28] 王小庆, 金先龙, 曹源. 大规模输水隧道水锤效应三维数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(1): 98-102.
- [29] 郭小虎. 丹江口下游近坝段河工模型试验为引江补汉工程开工提供技术支撑[J]. 中国水利, 2022(18): 76-76.

## Layout and shape of layered pressure reducing control gate in the middle segment of the Yangtze-to-Hanjiang River Water Diversion Project

CHEN Weijiang<sup>1</sup>, SHI Haifeng<sup>1</sup>, LI Chunyang<sup>1</sup>, JIANG Zhibing<sup>2</sup>, ZUO Li<sup>1</sup>, REN Kunjie<sup>2</sup>, YANG Qingyuan<sup>2</sup>

(1. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China )

**Abstract:** The control plan for the segment of the Yangtze-to-Hanjiang River Water Diversion Project will set the control gate at 164 km to avoid the problem of excessive internal pressure in local segments. The rationality of the overall layout of the tunnel line and the layout and shape of the control gate is demonstrated from the perspective of hydrodynamic characteristics.

A hybrid model combining a one-dimensional and three-dimensional mathematical model with a physical model was used for relevant research. The one-dimensional water hammer mathematical model is used to analyzed the entire hydraulic transition process of the gate opening and closing process. Through optimization calculations, a relatively optimal gate opening and closing process was obtained, while providing boundary conditions for the three-dimensional mathematical and physical models of the control gate segment. A three-dimensional water air two-phase flow mathematical model and a 1:25 scale hydraulic overall physical model are used to simulate and analyze hydraulic indicators such as flow patterns, water surface fluctuations, and pressure distribution on the overflow surface of the gate chamber and regulating pool. At the same time, a control gate discharge capacity curve is provided for a one-dimensional mathematical model.

The experimental research results indicate that when the control center hole arc door is opened with a three-stage variable speed process of slow first and then fast, the maximum water hammer pressure value of the entire line can be kept within the allowable range of the regulations; The pressure distribution on the overflow surface of the middle hole is normal, and the energy dissipation of the water in the regulating pool is sufficient. The water surface fluctuation at the inlet front of the lower pressure tunnel is small, and no adverse flow patterns such as suction vortices are observed.

The overall plan of adopting segmented layered pressure reduction control in this project is feasible, and the layout and shape of the control gates are reasonable. The research method can be used as a reference for similar projects.

**Key words:** Yangtze-to-Hanjiang River Water Diversion Project ; pressure reducing control gate; hybrid model; hydraulic transition process; hydrodynamic characteristics