

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222220

驷马山引江工程长距离输水过渡过程一维三维耦合分析

王俊贤¹, 刘国玉², 许仁义¹, 徐 波¹, 赵 磊¹, 陆书蒙¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 梯级泵站长距离有压输水管道上下游水情发生变化, 易导致管道内水压、流速等水力参数变化, 进而引起水锤。为满足管道的输水要求, 保障其在各工况下安全运行, 采用一维特征线法和三维 VOF 相耦合的方法对其进行数值模拟, 建立梯级泵站长距离输水系统过渡过程分析的数学模型。分析了驷马山引江工程的滁河四级站长距离输水系统在泵站停机、失电等工况条件下管道内压力、出水池水位的变化规律, 得出通过末闸和侧闸的合理启闭可以更好地保障整个管道系统的安全。

关键词: 长距离输水; 有压管道; 过渡过程计算; 闸门启闭规律; OpenFOAM; 驷马山引江工程

中图分类号: TV674

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0085-04

1 工程概况

驷马山滁河四级站干渠工程起始于驷马山滁河四级站出水口, 终止于江庄提水泵站进水前池, 总长 22.176 km, 输水干渠及关联泵站总体布置分为进口泵站及明渠、输水暗涵、出口江庄提水泵站三部分。滁河四级站由 3 台泵机组构成, 设计工况时其中 2 台机组正常运行, 设计流量为 27.12 m³/s。输水干渠采用重力有压地下暗涵输水方式, 暗涵进口前池设计水位 47.10 m, 底板高程 38.0 m; 暗涵出口即江庄提水泵站进水前池, 设计水位 32.60 m, 底板高程 24.90 m。江庄提水泵站布置 4 台(3 用 1 备)立式全调节混流泵, 设计流量为 27.12 m³/s。干渠沿线设置通气井 5 座、减压井 1 座, 通气井采用圆形竖井型式, 竖井直径 2.0 m; 减压井断面尺寸 6.0 m×6.0 m。系统布置简图见图 1。对于泵站运行中的瞬变流问题, 其难点在于该工程有压管道长、输送流量大,

且上下游均设置提水泵站, 泵站运行期机组正常的开、停机和荷载变化及事故断电均会引起暗涵内水压、流速等水力参数的变化, 严重影响有压管道安全^[1-3]; 恒定流要协调上下游水泵的流量平衡来确保进出水池、调压井等不会溢出; 瞬变流要协调各闸门的开闭曲线, 避免形成水锤危害系统的安全。然而, 目前关于梯级泵站长距离有压输水过渡过程的研究较少, 且主要集中在梯级泵站调度优化方面^[4,5], 有关水泵起动阶段可能引起的水锤分析研究^[6]亦有涉及, 但针对水泵失电停机等工况的研究结果较少, 且对梯级泵站的水锤防护手段比较单一, 集中在减压井设计方面^[7]。鉴此, 本文对整个工程沿线采用一维特征线法与三维 OpenFOAM 相耦合的方法, 建立了一维、三维模型, 对失电、停机等工况的水体参数进行数值模拟, 给出了闸门和侧闸的启闭规律, 提出了水锤防护方式建议, 对保证梯级泵站长距离有压管道输水系统安全具有一定意义。

2 水力过渡过程仿真计算数学模型

2.1 一维特征线法

水锤计算特征相容方程, 对于长度 L 的管道 A-B, 其两端点 A、B 边界在 t 时刻的瞬态水头 $H_A(t)$ 、 $H_B(t)$ 和瞬态流量 $Q_A(t)$ 、 $Q_B(t)$ 可建

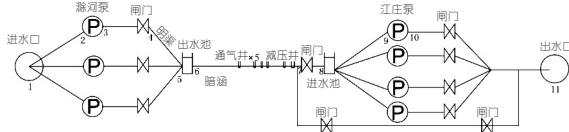


图 1 系统输水管道布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of water transmission pipeline of the system

收稿日期: 2022-10-22, 修回日期: 2023-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509216)

作者简介: 王俊贤(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为河流动力学及河流数值模拟, E-mail: wjx19971208@163.com

通讯作者: 许仁义(1980-), 男, 博士、讲师, 研究方向为河流动力学及河流数值模拟, E-mail: xury@yzu.edu.cn

立特征相容方程：

$$C^- : H_A(t) = C_M + R_M Q_A(t) \quad (1)$$

$$C^+ : H_B(t) = C_P + R_P Q_B(t) \quad (2)$$

其中

$$C_M = H_B(t - k \Delta t) - Q_B(t - k \Delta t) [a / (gA)]$$

$$R_M = a / (gA) + R |Q_B(t - k \Delta t)|$$

$$C_P = H_A(t - k \Delta t) + Q_A(t - k \Delta t) [a / (gA)]$$

$$R_P = a / (gA) + R |Q_A(t - k \Delta t)|$$

式中, t 为时间; Δt 为计算时间步长; a 为水锤波速; g 为重力加速度; A 为管道面积; k 为特征线网格管段数; R 为水头损失系数。

水泵全特性曲线方程是一种便于水锤计算的全特性曲线方程表达方式, 即:

$$v = \frac{Q}{Q_R}; \alpha = \frac{n}{n_R}; h = \frac{H}{H_R}; m = \frac{M}{M_R} \quad (3)$$

式中, v, α, h, m 均为无量纲值; Q, n, H, M 分别为任意时刻水泵流量、转速、扬程、转矩; Q_R, n_R, H_R, M_R 分别为水泵额定流量、额定转速、额定扬程、额定转矩。

2.2 三维 OpenFOAM 多相流控制方程

管道泄水过程为不可压缩两相流动, 其连续方程为:

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (4)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (5)$$

基于流体体积法 (VOF) 的组分方程为:

$$\partial \alpha_w / \partial t + u_i \partial \alpha_w / \partial x_i = 0 \quad (6)$$

每个单元内组分关系为:

$$\begin{cases} \alpha_w + \alpha_a = 1 \\ \rho = \alpha_w \rho_w + \alpha_a \rho_a \\ \nu = \alpha_w \nu_w + \alpha_a \nu_a \end{cases} \quad (7)$$

式中, u_i, u_j 均为速度分量; x_i, x_j 均为坐标分量; $i, j = 1, 2, 3$ 为求和指标; ρ 为控制体加权平均数; ν 为控制体加权平均运动粘性系数; α_w, α_a 分别为水、空气体积分数; ρ_w, ρ_a 分别为水、空气密度; ν_w, ν_a 分别为水、空气运动粘性系数。

3 计算要求与计算结果分析

3.1 计算要求

根据《泵站设计规范》(GB 50265-2010)^[8], 计算各工况的瞬态计算结果应满足: ①在各设计工况下运行时, 管道不应出现负压; ②水泵最大反转速不超过水泵额定转速的 1.2 倍, 超过额定转速时间不超过 2 min; ③管道最大压力小于 1.3~1.5

倍的管路设计工作压力; ④涵洞内沿线最小内水压力不小于 2 m。

对于泵站的运行工况, 计算分析了泵站正常运行恒定流工况、失电工况和正常停机工况, 并提出闸门启闭规律以满足计算要求。

3.2 泵站机组恒定流数值模拟

江庄站 3 台机组、滁河四级站 2 台机组运行, 选取设计工况, 即滁河四级站进水设计水位 (31.1 m)、2 台半调节水泵叶片角度为 +1°; 江庄站进水设计水位 (32.6 m)、3 台全调节机组的水泵叶片角度 -1°。首先对系统的恒定流进行计算校核, 驷马山滁河四级站干渠输水系统江庄站 3 台机组正常运行恒定流装置, 运行参数与数值模拟计算结果对比见表 1、2。由表 1、2 可知, 该结果与拟定的流量和水位计算结果接近, 可作为非恒定流计算分析的依据, 在此基础上进行瞬变流计算。

表 1 拟定的泵参数

站名	水泵叶片角度/(°)	出水池水位/m	单泵流量/(m ³ ·s ⁻¹)	泵装置扬程/m	泵装置效率/%	轴功率/kW
江庄站	-1	42.27	9.03	9.72	79	1 090
滁四站	+1	46.45	13.55	15.35	82	2 490

表 2 恒定流数值模拟结果

站名	泵站流量/(m ³ ·s ⁻¹)	单泵流量/(m ³ ·s ⁻¹)	泵站扬程/m	江庄站进水池水位/m	通道水损/m	输水涵洞最小内压/m
滁四站	27.14	13.57	15.30	32.6	13.8	3.5
江庄站	27.12	9.04	9.67			

由计算结果可知, 恒定流数值模拟与设计情况下的流量、水位接近, 可作为非恒定流计算分析的依据。恒定流的沿程管道压力分布见图 2。将测压管水头减去管道高程可以得到管道沿程的压力水头数值, 由此算出沿程最大管道压力为 6.7 m, 距离管道入口距离为 19 660 m。

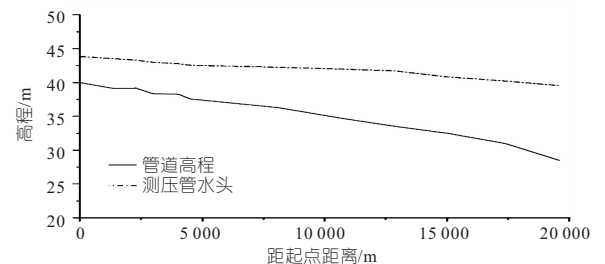


图 2 输水管道中心线高程和测压管水头线

Fig. 2 Central elevation line of water piping and head line of pressure measuring pipe

3.3 泵站机组失电工况过渡过程计算分析

对泵站由正常运行到失电工况进行计算, 通过对末闸和侧闸进行启闭操作, 以达到工程整体安全运行的需要, 先对侧闸是否需要开启进行计算, 再对选定闸门启闭方式进行多组计算。B1 工

况为江庄泵失电滁河泵正常运行工况; B2 工况为滁河泵失电江庄泵正常运行工况; B3 工况为江庄、滁河全部失电工况。计算结果见表 3。其测压管水头线见图 3。

表 3 泵站机组失电工况计算结果

Tab. 3 Calculation results of pump station unit under power-loss condition

序号	工况编号	末闸和侧闸动作	有压管道最大内压/m	有压管道最小内压/m	出水池最高/最低水位/m
#1	B1	末闸 300 s 关, 侧闸 300 s 开	14.55	3.5	40.2/32.8
#2	B1	末闸 300 s 关, 侧闸拒动	45.47	-10.3(负压)	41.8(溢出)/32.8
#3	B1	末闸 420 s 关, 侧闸拒动	38.86	-5.5(负压)	42.3(溢出)/32.8
#4	B1	末闸 480 s 关, 侧闸拒动	35.57	-3.1(负压)	43.0(溢出)/32.8
#5	B2	末闸 300 s 关, 侧闸 300 s 开	15.10	3.5	32.6/23.9(660 s)
#6	B2	末闸 300 s 关, 侧闸拒动	49.68	-14.1(负压)	32.6/23.9(623 s)
#7	B3	末闸 300 s 关, 侧闸 300 s 开	14.60	3.5	40.2/32.8
#8	B3	末闸 300 s 关, 侧闸拒动	44.80	-11.1(负压)	39.8/32.8

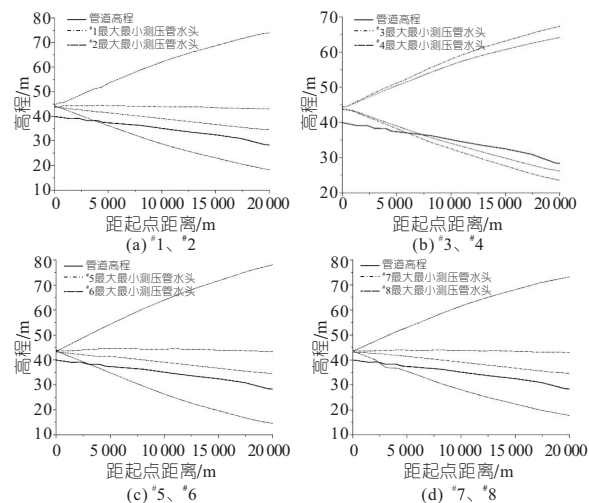


图 3 各工况管道压力线包络线

Fig. 3 Pressure envelope of pipeline under different working condition

由表 3 可知: ①在泵站机组失电的情况下, 有压管道末端侧闸必须打开, 否则会导致有压管道内部出现负压, 发生汽化现象; ②末闸延长关闭时间, 可以适度降低有压管道内的最大内压, 提高有压管道内的最小内压; ③末闸与侧闸配合, 按指定时间开启可以显著改善有压管道内的流态, 降低管道内水锤。综合分析得 #1、#5、#7 工况比较好施行。

3.4 泵站机组正常停机工况过渡过程计算与分析

泵站机组正常停机时, 涵洞末端侧面的闸门一直处于关闭状态, 暗涵末端正面闸门一直处于开启状态, 滁河四级站机组先行停机, 江庄泵站机组逐台停机, 直到管道内水位降至 36 m。由于江庄站进水池容量较小, 以进水池设计水位为开机时刻需要多次启、停水泵机组, 才能保证水泵机组的安全运行。当滁河泵站机组正常停机后, 系统

还能保证一段时间的正常管道输水, 此时有压管道最大、最小内压分别为 6.30、2.25 m。

当前池水位降低至管道入口最高高程以下, 管道内有自由水面, 无法进行有压计算。该工况涉及有压流到无压流的转换, 管道内的水况随着有压流与无压流的转换发生变化, 这时水位的变化不稳定, 一维计算无法体现这种复杂工况下水位变化的细节。对此, 引入 OpenFOAM 的多相流求解器 interFoam, 建立工程的三维模型, 然后进行正常停机工况下排水阶段的数值计算。

三维计算网格密度对计算结果的精度有一定影响, 因此需要对数学模拟的网格无关性进行验证。选取模型内部一固定点, 在控制边界条件不变的情况下, 对压力水头数值进行计算, 结果见表 4。由表 4 可看出, 在网格数为 50.17×10^4 个的情况下, 其固定点压力值相对误差小于 2%, 可认为基本不变, 因此选用 50.17×10^4 个网格。三维网格对圆管方管衔接处、调压井和管道连接处等局部进行加密, 三维建模的网格整体和局部示意图见图 4, 图 4 中画圈处为局部图位置, 由于三维模型网格数量大, 工程整体也较大, 计算耗时较长, 约 20 d。

表 4 不同网格数量时管道内固定点压力值计算结果

Tab. 4 Calculation results of the fixed point pressure value in pipe under different grid numbers

网格数量/ 10^4 个	网格质量	固定点压力值/m
35.23	0.88	4.99
42.18	0.90	4.88
44.23	0.90	4.78
50.17	0.90	4.71

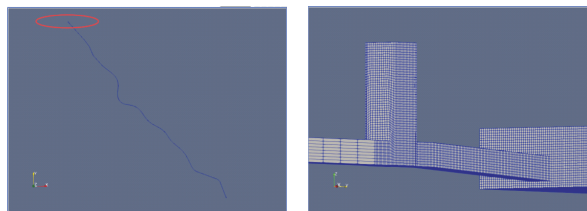


图 4 三维建模整体、局部网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 3D modeling overall and local grids

由于重力流流速较低, 为了保护泵机组和出水池最低水位, 使用逐台关闭江庄泵的方法, 在上游停机后, 3 台机组工作 90 min 后关闭江庄站第 1 台泵机组, 5 min 后再关 1 台, 同时开启 1 台泵抽水, 直到最低水位 30.7 m, 然后江庄站泵机组全关, 管道内无压流继续向出水池注水, 注水至最高水位 36 m 时再开泵抽水, 循环操作 20 次可使系统内水位稳定在 36 m, 机组正常停机暗涵内水

位变化见图 5。

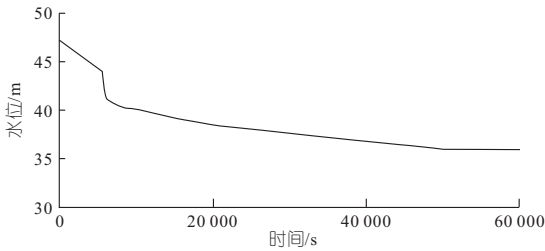


图 5 机组正常停机工况管道内水位变化过程线

Fig. 5 Water level change hydrograph in pipeline during normal shutdown condition of unit

用 OpenFOAM 对该工况进行模拟, 计算时间较长, 模拟效果较好, 但由于无压重力流数值小于江庄泵抽水性能, 导致需要反复启停泵抽水以平衡水位。

4 结论

a. 通过对驷马山引江工程长距离输水系统过渡过程进行模拟计算, 可以看出单靠减压井不能保证复杂工况下的系统安全。对梯级泵站长距离有压管道输水系统的复杂工况, 应通过末闸和侧闸的联动启闭降低管道内水锤, 并结合减压井的调节功能和侧闸的辅助排水, 有效保证整个管路的安全。

b. OpenFOAM 通过文件设置能较好地对有

自由液面的管道内水体进行三维模拟, 但计算时间较长, 且结果读取较复杂, 还需进行优化。

参考文献:

- [1] 廖功磊, 钟林涛, 蒋辉霞, 等. 长距离输水管道水力过渡分析及水锤防护措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 177-180.
- [2] 吴远为, 刘梅清, 刘志勇, 等. 长距离重力流输水系统的爆管过渡过程和阀门关闭规律的研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 119-123.
- [3] 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, 2022(1): 49-52.
- [4] 王吉勇, 胡剑, 廖铭新, 等. 跨区域大型梯级排水泵站群联合调度方案研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 127-130, 96.
- [5] 李娜, 吴建华, 刘亚明, 等. 张峰水库梯级泵站供水系统优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 164-167.
- [6] 周大庆, 吴玉林, 张仁田. 大型立式轴流泵站起动过渡过程研究[J]. 水力发电学报, 2007(1): 119-122, 28.
- [7] 冯婷, 贾亚军, 谢仁杰. 梯级泵站串联加压长距离输水的水锤特点及防护措施[J]. 中国给水排水, 2008(14): 51-54.
- [8] 中华人民共和国水利部. 泵站设计规范: GB 50265-2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

1D and 3D Coupled Analysis of Transient Process of Long-distance Pressurized Water Delivery in Simashan River Diversion Project

WANG Jun-xian¹, LIU Guo-yu², XU Ren-yi¹, XU Bo¹, ZHAO Lei¹, LU Shu-meng¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Anhui Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower Company Limited, Hefei 230088, China)

Abstract: When upstream and downstream water regime changed in long-distance pressurized water delivery pipeline of cascade pump stations, it is easy to cause the change of water pressure in pipeline and hydraulic parameters such as flow velocity, and results in water hammer. In order to meet the water delivery requirements of the pipeline and ensure its safe operation under various working conditions, one-dimensional characteristics method and 3D VOF coupled methods were used to simulate. The mathematical model for transient process analysis of long-distance water delivery system of cascade pump stations was established to analyze the change and law of pipeline internal pressure and water level in outlet pool during long-distance water delivery system in Chuhe Level IV station of Simashan River Diversion Project under working conditions, such as suspending period and power losing period. It also shows that the safety of the entire pipeline system can be better guaranteed though the reasonable open-close laws of the terminal gate and side gate.

Key words: long-distance water delivery; pressurized pipeline; calculation of transient process; sluice gate open-close mechanism; OpenFOAM; Simashan River Diversion Project