

考虑动态摩阻的抽水蓄能电站
水力瞬变建模模拟吴金远^{1,2}, 周领^{1*}, 刘德有³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 3. 国际小水电中心, 浙江 杭州 310002)



吴金远

摘要: 针对抽水蓄能电站管道内水力瞬变问题, 考虑动态摩阻, 采用二阶有限体积法(FVM) Godunov 格式进行数值建模与模拟. 首先根据有限体积法将控制方程进行离散, 通量计算用 Riemann 求解器. 机组全特性曲线采用改进的 Suter 变换, 在计算中分别考虑 Brunone 与 TVB 动态摩阻模型, 将计算结果与恒定摩阻和试验值进行对比, 并进行了相应的参数敏感性分析. 结果表明, 在抽水蓄能电站管路模型中, 动态摩阻模型仅增加了管道内后续波动的衰减, 对于初始波动几乎没有影响. 在单管中, 动态摩阻的影响随着关阀时间的缩短而增大; 而在抽水蓄能电站系统中由于雷诺数较大, 动态摩阻模型的适用性较差, 对于各项物理参数的变化均不敏感. 这表明在大管径、高流速的输水工程中, 可忽略动态摩阻的影响, 但对于小管径、低流速的工程, 有必要考虑动态摩阻的影响.

关键词: 抽水蓄能水电站; 有限体积法; Godunov 格式; 动态摩阻; 水力瞬变

中图分类号: TV143.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2024)06-0612-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.22.0243

吴金远, 周领, 刘德有. 考虑动态摩阻的抽水蓄能电站水力瞬变建模模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(6): 612-618, 648.

WU Jinyuan, ZHOU Ling, LIU Deyou. Numerical simulation of hydraulic transients in pumped storage power station with unsteady friction[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2024, 42(6): 612-618, 648. (in Chinese)

Numerical simulation of hydraulic transients in pumped
storage power station with unsteady frictionWU Jinyuan^{1,2}, ZHOU Ling^{1*}, LIU Deyou³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. International Center on Small Hydro Power, Hangzhou, Zhejiang 310002, China)

Abstract: By taking unsteady friction into account, the second-order finite volume method (FVM) Godunov scheme was utilized to undertake numerical simulation in order to investigate the hydraulic transient problem in the pipelines of pumped storage power plants. Firstly, the governing equations of the mathematical model were discretized according to the finite volume method, and the flux was calculated using the Riemann solver. The whole characteristic curves of the unit were transformed by using the improved Suter approach, and the Brunone and TVB unsteady friction models were respectively considered in the calculation. The calculated results of the proposed scheme were compared with that of the steady friction scheme and the measured data, and the corresponding parameter sensitivity analysis

收稿日期: 2022-10-16; 修回日期: 2023-03-31; 网络出版时间: 2024-06-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1814.TH.20240530.1635.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51839008, 51679066); 霍英东教育基金会青年教师基金项目(161068)

第一作者简介: 吴金远(1997—), 男, 江苏宜兴人, 助理工程师(wjy_hhu@163.com), 主要从事水电站、泵站水力学研究.

通信作者简介: 周领(1985—), 男, 安徽滁州人, 教授(zlhhu@163.com), 主要从事水电站、泵站水力学研究.

was also performed. The results show that the unsteady friction only increases the attenuation of subsequent fluctuations in the pipeline, but has little effect on the initial fluctuations in the pumped storage station pipe network model. In a single pipe, the influence of unsteady friction increases with the shortening of valve closing time. Due to the large Reynolds number in pumped storage power station systems, the unsteady friction model has poor applicability and is insensitive to changes in the related physical parameters. This shows that in water transmission projects with large pipe diameters and high flow rates, the impact of dynamic friction can be ignored, but for projects with small pipe diameters and low flow rates, the consideration of dynamic friction is still necessary.

Key words: pumped storage power station; finite volume method; Godunov scheme; unsteady friction; hydraulic transients

在抽水蓄能电站的建模模拟过程中,一般采用传统的特征线法(method of characteristics, MOC)进行模拟计算,作为传统的水锤计算模型,MOC有着计算精度高、编程方便等特点,但是在实际的抽水蓄能电站工程中往往存在许多短管,而MOC为了满足库朗数条件需要进行插值计算或者简化模型,这样会造成计算精度的降低。且在常规的水锤计算模型中,一般只考虑恒定摩阻模型,即在计算瞬变过程中,管道内的摩阻始终与恒定流状态摩阻相同。但是在实际瞬变过程中,管道内的摩阻受到多方面因素的影响,计算结果可能与实际结果相差较大,更无法准确描述压力波的波形畸变与峰值衰减^[1]。

由于水锤计算模型为双曲型偏微分方程,在计算过程中可能会出现一个非正则解^[2],而使用守恒量形式的有限体积法(finite volume method, FVM)则特别适用于对非正则解的追踪^[3]。GUINOT^[4]最早将FVM运用于水锤问题,得到了和MOC相类似的格式。LEÓN等^[5]建立了一种基于有限体积法Godunov格式的二阶精度方法,该公式不仅保持了该格式的守恒性,而且能够在计算领域不引入非物理扰动。

如今,应用最广的动态摩阻模型共有2类,一类是以Zielke模型^[6]为代表的加权函数类模型,另一类是以Brunone模型^[7]为代表的经验修正类模型。Zielke模型中管道瞬变流中瞬时管壁切应力由恒定项和附加项组成,但其计算存储空间较大,计算时间较长。TRIKHA等^[8]、VARDY等^[9-10]对Zielke模型进行简化,得到了计算效率较高的计算模型。Brunone模型将非恒定摩阻与瞬时当地加速度和对流加速度联系起来,VÍTKOVSKÝ等^[11]在Brunone模型基础上进行了改进,可预测特定方向的水流和波的方向。

为了更准确地模拟抽水蓄能电站的水力瞬变过程,文中采用二阶Godunov格式的FVM,并在计

算过程中分别加入Trikha-Vardy-Brown(TVB)与Brunone动态摩阻,以实现某抽水蓄能电站的水力瞬变模拟,并将结果与恒定摩阻模型和试验值进行对比,并研究转动惯量等参数的敏感性。

1 数学模型及其求解

1.1 水锤控制方程

对于管道内的瞬变流,其控制方程可由连续性方程与动量方程得到,同时忽略对流项的影响,可写成经典水锤方程^[12]为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S, \quad (1)$$

其中, $U = \begin{pmatrix} H \\ v \end{pmatrix}$, $F = \bar{A}U$, $\bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & a^2/g \\ g & 0 \end{pmatrix}$, $S = \begin{pmatrix} 0 \\ gS_0 - gJ \end{pmatrix}$,

式中: H 为测压管水头, m; v 为流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; a 为波速, m/s; J 为管道摩阻, 包含恒定摩阻与动态摩阻; S_0 为管道坡度; x 为沿管轴线距离, m; t 为时间, s。

有限体积法是通过将计算区域离散后的各单元体的积分来求解参数。图1为计算区域网格。

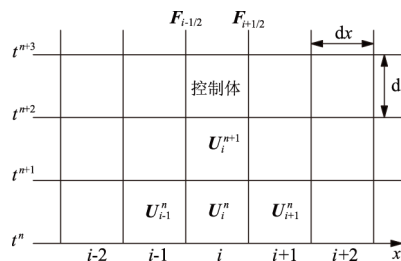


图1 计算区域网格

Fig.1 Grid of computational region

考虑到各单元体在时空内均为连续均匀分布,故其求解格式写成如下形式,即

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2} - F_{i-1/2}) + \frac{\Delta t}{\Delta x} \int_{i-1/2}^{i+1/2} S dx, \quad (2)$$

式中: i 为第 i 个控制体; $F_{i+1/2}$ 为控制体右边界处的通量; $F_{i-1/2}$ 为控制体左边界处的通量; Δt 为时间步长, s; Δx 为空间步长, m; 上标 n 为 t 时刻; 上标 $n+1$ 为 $t+\Delta t$ 时刻。

1.2 水泵水轮机控制方程

1.2.1 全特性曲线

水泵水轮机的全特性曲线用来反映在不同开度情况下水泵水轮机的各项特征参数间的关系。但是由于全特性曲线存在交叉、聚集、多值性等特点, 因此需要对全特性曲线进行转换, 才能够进行水泵水轮机各项特征参数的计算。由于常规的 Suter 变换^[13]无法表示 0 开度线下转速、流量、力矩间的关系, 且在小开度情况下精度较差, 因此文中采用改进的 Suter 变换, 不仅可以表示 0 开度线下各参数的关系, 对于小开度下曲线的疏密问题也有所改善, 具体形式为

$$WH(x, y) = h / [(q + c\sqrt{h})^2 + n^2], \quad (3)$$

$$WM(x, y) = m/h, \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = \arctan [(q + c\sqrt{h})/n], & n \geq 0, \\ x = \arctan [(q + c\sqrt{h})/n] + \pi, & n < 0, \end{cases} \quad (5)$$

式中: WH 和 WM 分别为水头特性函数和力矩特性函数; x 为相对流量角; y 为相对导叶开度; q 为相对单位流量, $q = Q_{11}/Q_{11r}$; n 为相对单位转速, $n = N_{11}/N_{11r}$; h 为相对水头, $h = H/H_r$; m 为相对单位力矩, $m = M_{11}/M_{11r}$; 下标 11 表示单位值, 下标 r 表示额定值; c 为常数, 一般取 1.0~1.5, 文中 c 取 1.2。

1.2.2 转速平衡方程

水泵水轮机甩荷工况下, 转速平衡方程^[14]为

$$n = n_0 + \Delta t(m + m_0)/2T_a, \quad (6)$$

式中: T_a 为机组惯性时间常数, $T_a = \frac{GD^2 N_r^2}{365 P_r}$, 其中 GD^2 为机组转动惯量, $t \cdot m^2$; N_r 为机组额定转速, r/min; P_r 为机组额定功率, kW; 下标 0 表示上一时刻的值。

1.2.3 水头平衡方程

设蜗壳前和尾水管后压力钢管分别为节点 1 和 2, 在分别带入特征线方程后, 带入水轮机水头计算方程, 可得到水头平衡方程^[14]为

$$h = [C_{p1} - C_{m2} - (B_{p1} + B_{m2}) Q_r q + C_2 |q| q] / H_r, \quad (7)$$

式中: C_{p1} , B_{p1} 分别为蜗壳的特征线参数值; C_{m2} , B_{m2} 分别为尾水管处的特征线参数值; 系数 $C_2 = Q_r^2 (1/A_1^2 - 1/A_2^2) / 2g$; A_1 , A_2 分别为蜗壳处、尾水管处压力钢管的面积。

联立式(3), (4), (6) 和 (7), 即可求出各瞬变时刻机组的水头、流量、转速、力矩等参数。

1.3 动态摩阻方程

1.3.1 TVB 动态摩阻模型

TVB 动态摩阻模型基于 Zielke 模型, 但对其进行简化, 对加权函数进行近似求解, 同时采用更多的加权函数系数, 使得计算效率大大提升, 且精度却并未明显下降, 其具体模型形式为

$$J = J_s + J_u, \quad (8)$$

$$J_u = \frac{16\nu}{gD^2} \sum_{i=1}^9 y_i, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y_i(t + \Delta t) &= y_i(t) e^{-\eta_i(4\nu/D^2)\Delta t} + \\ m_i \frac{1 - e^{-\eta_i(4\nu/D^2)\Delta t}}{\eta_i(4\nu/D^2)\Delta t} [v(t + \Delta t) - v(t)], \end{aligned} \quad (10)$$

式中: 加权函数系数 η_i 与 m_i 的取值为 η_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) 分别为 26.374 4, 10^2 , $10^{2.5}$, 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 ; m_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) 分别为 1, 2.183 0, 2.714 0, 7.545 5, 39.006 6, 106.807 5, 359.084 6, 1 107.929 5, 3 540.683 0; J 为系统的总摩阻; J_s 为恒定摩阻, 采用 Darcy-Weisbach 公式计算; J_u 为动态摩阻; ν 为水体的运动黏度, 文中取 $1.118 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; D 为压力钢管直径, v 为管道内流速。

1.3.2 Brunone 动态摩阻模型

Brunone 使用瞬时当地加速度和对流加速度来表示动态摩阻中的非恒定摩阻部分, Vitkovsky 在 Brunone 的基础上, 加入了对水流流动方向的判别, 其计算精度更高, 具体模型形式为

$$J_u = \frac{k_3}{g} \left[\frac{\partial v}{\partial t} + a \text{SGN}(v) \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right| \right], \quad (11)$$

式中: k_3 为 Brunone 摩擦系数, $k_3 = \sqrt{C^*}/2$, 其中 C^* 为剪切衰减常数, 取值取决于雷诺数 Re , 当管道内水流为层流时, $C^* = 0.004 76$, 当管道内水流为紊流时, $C^* = 7.41/Re^{\lg(14.3/Re^{0.05})}$; $\text{SGN}(v)$ 的取值取决于水流流向, 若 $v > 0$, 则 $\text{SGN}(v) = 1$, 若 $v < 0$, 则 $\text{SGN}(v) = -1$ 。

1.4 二阶 Godunov 求解格式

1.4.1 通量计算

在有限体积法的计算中, 各单元体内的物理变量是连续的, 而通量是间断的, 因此采用 Riemann 问

题的求解格式进行计算,可得到边界处的通量值为

$$\begin{aligned} F_{i+\frac{1}{2}} &= A_{i+\frac{1}{2}} U_{i+\frac{1}{2}}(t) = \\ &= \frac{1}{2} A_{i+\frac{1}{2}} \left[\begin{pmatrix} 1 & a/g \\ g/a & 1 \end{pmatrix} U_L^n + \begin{pmatrix} 1 & -a/g \\ -g/a & 1 \end{pmatrix} U_R^n \right], \end{aligned} \quad (12)$$

式中: U_L^n 为单元体 i 在边界 $i+1/2$ 左侧界面的平均值, U_R^n 为单元体 i 在边界 $i+1/2$ 右侧界面的平均值。

为了得到二阶 Godunov 格式的通量计算值,需要二阶精度的 U_L^n 和 U_R^n , 因此需要进行线性重构。

第一步,数据重组,同时引入 MINMOD 斜率限制器函数,可避免产生虚假振荡:

$$U_i^L = U_i^n - \frac{\Delta x}{2} \Delta i, \quad (13)$$

$$U_i^R = U_i^n + \frac{\Delta x}{2} \Delta i, \quad (14)$$

Δi 可由 MINMOD 斜率限制器函数计算得到

$$\Delta i = \begin{cases} \sigma_i^n, & |\sigma_i^n| < |\sigma_{i-1}^n| \text{ 且 } \sigma_i^n \sigma_{i-1}^n > 0, \\ \sigma_{i-1}^n, & |\sigma_i^n| > |\sigma_{i-1}^n| \text{ 且 } \sigma_i^n \sigma_{i-1}^n > 0, \\ 0, & \sigma_i^n \sigma_{i-1}^n \leq 0, \end{cases} \quad (15)$$

$$\sigma_i^n = (U_{i+1}^n - U_i^n) / \Delta x, \quad (16)$$

$$\sigma_{i-1}^n = (U_i^n - U_{i-1}^n) / \Delta x. \quad (17)$$

第二步,推进时间计算:

$$\bar{U}_i^R = U_i^R + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\bar{A}U_i^L - \bar{A}U_i^R), \quad (18)$$

$$\bar{U}_i^L = U_i^L + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\bar{A}U_i^L - \bar{A}U_i^R). \quad (19)$$

第三步,求解 Riemann 问题:

$$U_L^n = \bar{U}_i^R, U_R^n = \bar{U}_{i+1}^L. \quad (20)$$

将计算得到的二阶精度的 U_L^n 和 U_R^n 带入式 (12),则可求出各单元体边界处二阶精度的通量计算值。

1.4.2 时间积分

在得到二阶精度的通量计算值后,可满足计算结果在空间上的二阶精度.为了同时满足空间和时间上的二阶精度,因此采用二阶显式的龙格库塔法对式 (2) 进行时间积分,具体计算过程为

$$U_i^{n+1} = \bar{U}_i^{n+1} + \Delta t S(\bar{U}_i^{n+1}), \quad (21)$$

$$\bar{U}_i^{n+1} = \bar{U}_i^{n+1} + \frac{\Delta t}{2} S(\bar{U}_i^{n+1}), \quad (22)$$

$$\bar{U}_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}}). \quad (23)$$

1.4.3 虚拟边界

由上述二阶精度的 Godunov 的求解格式可知,为了求解任一单元体 i 的物理量,均需要该单元体左右各 2 个单元体的物理量,因此需要对管道两边的单元体计算进行特殊处理.文中采取分别在管道的两边添加 2 个虚拟单元-1,0 和 $NUM+1, NUM+2$ 的虚拟单元方法,不仅方便了编程计算,更实现了计算管道内部与边界处计算的统一性。

对于新添加的虚拟单元体的物理变量不仅满足该边界处的 Riemann 不变量方程,还满足以下条件:

$$U_{-1} = U_0 = U_{1/2}, \quad (24)$$

$$U_{NUM+1} = U_{NUM+2} = U_{NUM+1/2}. \quad (25)$$

2 计算分析

2.1 模型验证

2.1.1 试验验证

为了验证上述 Godunov 的求解格式与动态摩阻模型的正确性,采用 BERGANT 等^[15] 试验中的具体参数:上游恒定水头 $H_t = 32$ m,管道长度 $L = 37.23$ m,管道直径 $D = 0.022$ 1 m,管道内波速 $v_c = 1\,319.00$ m/s,恒定摩阻系数 $f = 0.034$, $\nu = 1.184 \times 10^{-6}$ m²/s,初始流速 $v_0 = 0.3$ m/s.采用二阶 Godunov 求解格式对上述系统进行求解计算,并分别加入 TVB 与 Brunone 动态摩阻模型,以此来验证模型的准确性.图 2 为试验验证结果。

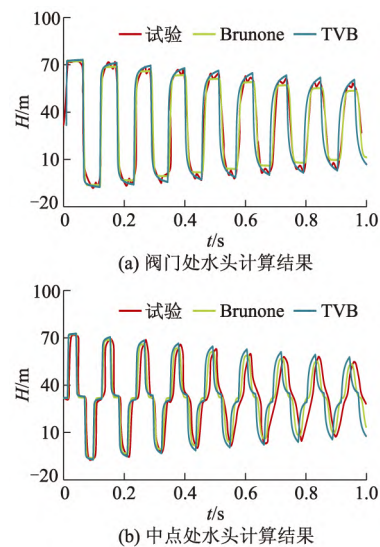


图 2 试验验证结果

Fig.2 Experimental verification results

如图 2 所示,在分别考虑 TVB 和 Brunone 动态摩阻模型后,采用二阶 Godunov 求解格式的计算结

果与试验计算结果基本吻合,证明了文中所采用的二阶 Godunov 求解格式与动态摩阻模型的准确性。

2.1.2 抽蓄算例验证

已知某抽蓄电站设有2台可逆式机组,上游引水系统采用“一管双机”、下游尾水系统采用“一管一机”的布置方式,电站相关参数:额定水头为105.8 m,额定流量148.8 m³/s,额定转速200 r/min,额定功率139 000 kW,转动惯量10 920 t·m²,电站布置如图3所示,图中L1—L11表示第1—11根压力钢管,相关设计参数如表1所示,表中, q 为管道糙率; θ 为管道角度。

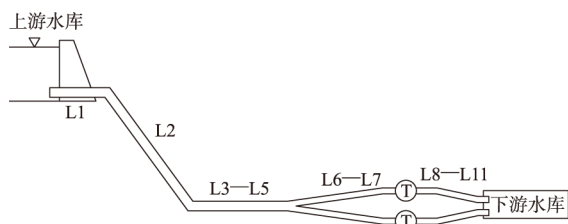
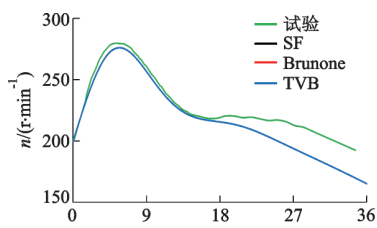


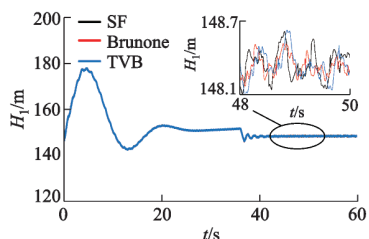
图3 电站布置图

Fig.3 Layout of a pumped storage power station

分别用恒定摩阻与动态摩阻模型模拟上述抽蓄模型,并与试验值对比,计算工况如表2所示,表中: H_{up} 为电站上游水头,m; H_{dn} 为电站下游水头,m; O_{ini} 为导叶初始开度,%; T_1 为第1段导叶关闭时间,s; T_2 为第2段导叶关闭时间,s; O_{tr} 为导叶转折开度,%。

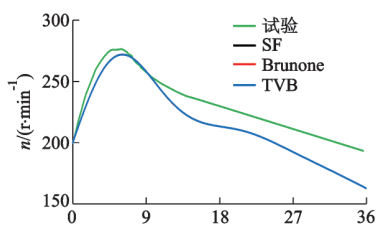


(i) 转速

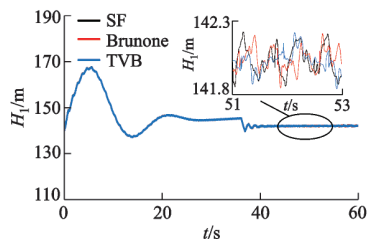


(ii) 蜗壳处水头

(a) 工况1

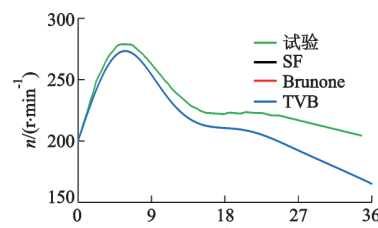


(i) 转速

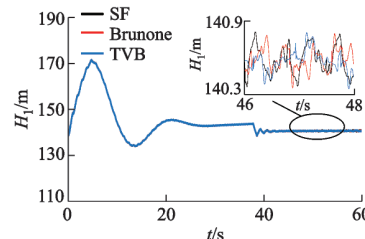


(ii) 蜗壳处水头

(b) 工况2



(i) 转速



(ii) 蜗壳处水头

(c) 工况3

图4 试验验证结果

Fig.4 Results of experimental verification

2.2 参数敏感性分析

2.2.1 简单管路

设置一上游为水库、下游为阀门的简单管道,其具体参数: $H_r = 5$ m, $D = 0.1$ m, $L = 600.00$ m, $v_c =$

1 200.00 m/s,水的运动黏滞系数 $\nu = 1.184 \times 10^{-6}$ m²/s,恒定摩阻系数 $f = 0.009$,初始流速 $v_0 = 0.1$ m/s,总的计算时间取20 s,下游阀门全开时开度为

$$\tau = (1 - t_0/T_c)^{1.5}, \quad (26)$$

表1 管道参数

Tab.1 Parameters of water pipe system

压力钢管	D/m	L/m	q	$\theta/(^\circ)$	$v/(m \cdot s^{-1})$
L1	8.00	15.39	0.014	0	976.40
L2	8.00	169.26	0.014	-50.71	976.40
L3	8.00	20.77	0.014	0	976.40
L4	8.00	56.40	0.015	0	976.40
L5	8.00	26.60	0.014	0	976.40
L6	4.20	100.33	0.013	0	1 202.30
L7	4.55	5.40	0.013	0	1 210.80
L8	6.09	14.00	0.014	0	1 045.10
L9	6.20	70.94	0.014	0	1 045.10
L10	6.20	25.52	0.014	60.00	1 152.75
L11	6.20	13.60	0.014	0	1 152.75

表2 机组100%甩负荷计算工况参数

Tab.2 Unit 100% load rejection calculation working condition parameters

工况	H_{up}/m	H_{dn}/m	$O_{ini}/\%$	T_1/s	T_2/s	$O_{tr}/\%$
1	412.40	290.97	73.80	3.62	32.53	60.00
2	406.08	290.60	74.30	5.64	30.53	61.13
3	404.70	290.38	78.93	4.80	33.00	59.96

2种方法在计算时间段内计算结果如图4所示,图中 n 为转速,文中所采用的模型计算结果可以较好地模拟该系统的转速试验值,说明了文中所采用的计算模型对于该抽蓄管路的计算有一定的适用性与准确性,且分析比较各工况中的蜗壳处水头 H_1 的计算结果,动态摩阻模型在计算的初始波动周期内几乎没有产生过大的影响,但在后续的小波动中,会产生比恒定摩阻模型大的波动衰减。

式中: τ 为阀门相对开度; t_0 为计算时刻值; T_c 为阀门关闭的总时长。

采用二阶 Godunov 求解格式进行水锤求解, 比较分析不同关阀总时长 T_c (5, 2, 1 s 和瞬时关闭) 下动态摩阻模型对阀门处水锤结果的影响。

图 5 为动态摩阻对于不同关阀时间的影响, 如图所示, 在阀门关闭后的初始周期内, 动态摩阻对阀门处水头压力影响很小; 但是随着关阀时间的缩短, 对于只考虑恒定摩阻的工况, 其压力波在后续周期内并未出现很明显的峰值衰减, 这与实际情况也是相悖的。但是对于考虑动态摩阻的工况, 不管是 TVB 还是 Brunone 动态摩阻模型, 其压力波在后续周期内均会出现较为明显的峰值衰减, 且衰减幅度随着关阀时间的加快而增大, 同时伴有一定的相位偏移。这是因为动态摩阻对计算结果的影响主要集中在后续的压力衰减过程中, 且在计算中或是考虑了恒定的管壁切应力及其附加项 (TVB 模型) 的影响, 或是考虑了当地加速度和迁移加速度 (Brunone 模型) 的影响, 均对计算结果有一定的修正作用。

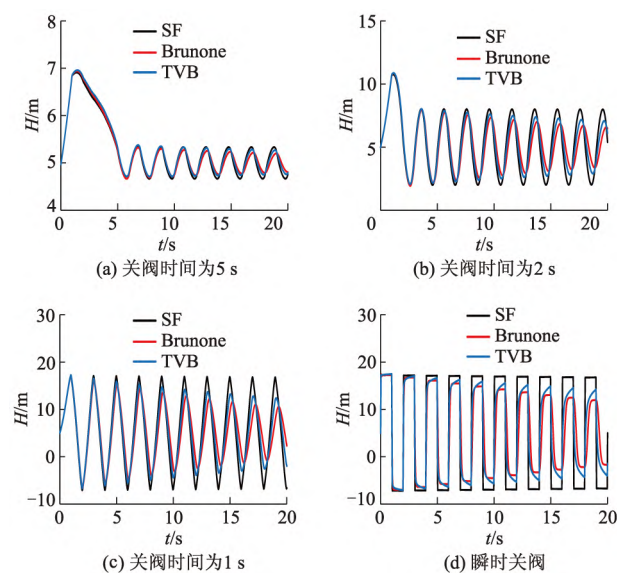


图 5 动态摩阻对于不同关阀时间的影响
Fig.5 Effects of unsteady friction on different valve closing time

2.2.2 抽蓄管路

为了研究不同模型参数值及动态摩阻对于瞬态计算的影响, 针对 2.1.2 中的抽蓄算例中的甩负荷工况 1 进行参数敏感性分析, 具体考虑了转动惯量与关阀时间对于抽蓄瞬态计算结果的影响, 并采用扰动分析法^[14]进行分析, 扰动步长确定为 10%, 机组转动惯量 GD^2 的取值为基准值的 80% ~

120%; 阀门关闭时间 T_c 取标准值的 10% ~ 100%。具体计算结果如图 6 所示。图中反映了在最大与最小的转动惯量情况下, 动态摩阻对于蜗壳处水头 H_1 与尾水管处水头 H_2 的影响情况。结果显示, 在上述 2 种情况下, 动态摩阻与恒定摩阻间的计算误差并没有随着转动惯量的增加而增加, 但是随着转动惯量的增加, 蜗壳处的水头有明显的下降趋势, 而尾水管处的水头则相反。

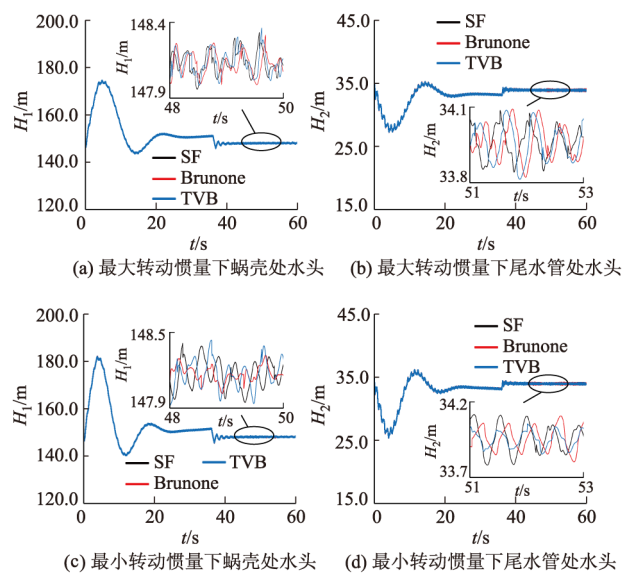


图 6 不同转动惯量下的计算结果
Fig.6 Calculation results under different moment of inertia

图 7 为变量随转动惯量的变化, 图中 δ 为计算变化率, PC_{GD^2} 为 GD^2 扰动系数。图中显示了在不同的转动惯量条件下, 蜗壳处水头、尾水管水头与转速的变化情况, 其中横纵坐标均采用标准化处理后的结果。结果显示, 随着转动惯量的增加, 各物理参数变量均向着更安全的方向变化, 且各变量的变化情况均呈线性分布。

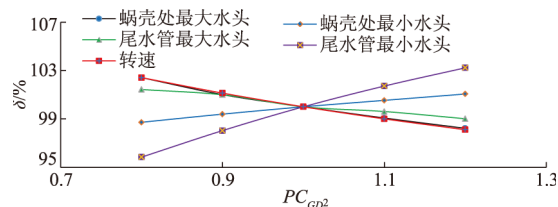


图 7 变量随转动惯量的变化
Fig.7 Changes of variables with moment of inertia

图 8 显示了在最快与最慢的导叶关闭时间下, 动态摩阻对蜗壳与尾水管处水头的影响情况。结果表明, 在阀门关得越快时, 动态摩阻模型与常态摩阻模型间的误差会增加, 且 Brunone 动态摩阻模型

衰减效果优于 TVB 模型,但是衰减的幅度较整体的计算值并不是很大.这是因为 TVB 模型是根据层流公式推导的,对紊流不够适用.而 Brunone 动态模型虽然适用于紊流,但一般运用于雷诺数小于 10^8 的

管道中.而在该抽蓄管路瞬变模型中,由于管路中管道直径和流速均较大,其雷诺数已经超过 10^8 ,所以在算例中 Brunone 动态摩阻模型计算结果略优于 TVB 动态摩阻模型,但对于整体的计算结果影响不大.

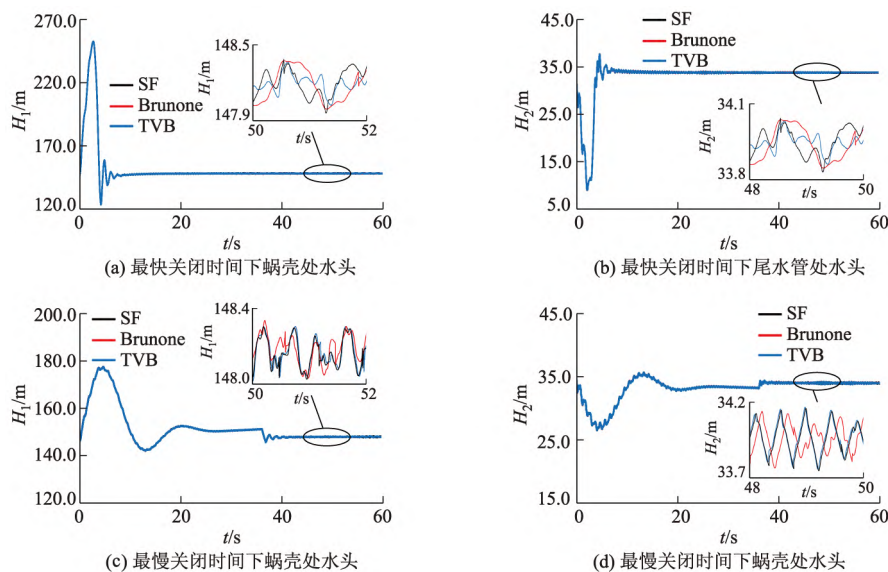


图 8 同导叶关闭时间下的计算结果

Fig.8 Calculation results under the same guide vane closing time

3 结 论

1) 考虑 Brunone 与 TVB 动态摩阻的 FVM 模型,可以得到与试验值相近的结果,证明了模型的准确性.

2) 通过改变单管模型的关阀时间,分析了管道中动态摩阻对阀门处水头计算结果的影响,结果表明在考虑动态摩阻模型后,计算压力波在 4,5 个周期后出现明显的峰值衰减,且衰减幅度随着关阀时间的加快而增大.

3) 分析比较了动态摩阻模型对于转动惯量与导叶关闭时间的敏感性,结果表明在文中的抽蓄算例中,动态摩阻模型对于上述参数的变化均不敏感.因为在处理实际工程复杂管路系统中的水力瞬变问题时,管道内雷诺数通常都较大,动态摩阻的影响不显著.然而,在管道直径与流速都相对较小的实际工程中有必要考虑动态摩阻.

参考文献(References)

- [1] 刘静,周领,曹波,等.瞬变流中加权类动态摩阻模型的二阶近似求解[J].水力发电学报,2020,39(4): 55-61.
LIU Jing, ZHOU Ling, CAO Bo, et al. Second-order ap-

- proximate solution of the weight-function unsteady friction model of transient flows [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2020, 39(4): 55-61. (in Chinese)
[2] 路梦瑶,田雨,刘小莲.长距离有压输水系统事故停泵水锤防护措施研究[J].水利水电技术(中英文), 2022, 53(S2): 243-248.
LU Mengyao, TIAN Yu, LIU Xiaolian. Study on protective measures of water hammer caused by accidental pump shutdown in long-distance pressurized water conveyance system [J]. Water resources and hydropower engineering, 2022, 53(S2): 243-248. (in Chinese)
[3] 李大鸣,刘训平,段丽瑶,等.基于 AHP 的泥石流区域预报数学模型研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(9): 900-906.
LI Daming, LIU Xunping, DUAN Liyao, et al. Forecasting mathematical model of regional debris flow based on AHP [J]. Journal of Tianjin University (science and technology), 2017, 50(9): 900-906. (in Chinese)
[4] GUINOT V. Riemann solvers for water hammer simulations by Godunov method [J]. International journal for numerical methods in engineering, 2000, 49: 851-870.
[5] LEÓN A S, GHIDAoui M S, SCHMIDT A R, et al. An efficient finite-volume scheme for modeling water hammer flows [J]. Journal of water management modeling, 2007: 411-430.

(下转第 648 页)

- 灌玉米灌溉制度研究 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51 (7): 190-196.
- JIANG Zhengwen, YUE Hongwei, CHEN Jiao, et al. Study on drip irrigation system of maize in Ningxia area based on membership function method [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2023, 51 (7): 190-196. (in Chinese)
- [15] 王兴鹏, 辛朗, 杜江涛, 等. 基于 DSSAT 模型的南疆膜下滴灌棉花生长与产量模拟 [J]. 农业机械学报, 2022, 53 (9): 314-321.
- WANG Xingpeng, XIN Lang, DU Jiangtao, et al. Simulation of cotton growth and yield under film drip irrigation condition based on DSSAT model in Southern Xinjiang [J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53 (9): 314-321. (in Chinese)
- [16] 王峰, 孙景生, 刘祖贵, 等. 灌溉制度对机采棉生长、产量及品质的影响 [J]. 棉花学报, 2014, 26 (1): 41-48.
- WANG Feng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effects of irrigation scheduling on growth, yield and fiber quality of cotton under mechanical harvest cropping model [J]. Cotton science, 2014, 26 (1): 41-48. (in Chinese)
- [17] 李志军, 王海东, 张富仓, 等. 新疆滴灌施肥棉花生长和产量的水肥耦合效应 [J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33 (12): 1069-1077.
- LI Zhijun, WANG Haidong, ZHANG Fucang, et al. Effects of water-fertilizer coupling on field cotton growth and yield under fertigation in Xinjiang [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015, 33 (12): 1069-1077. (in Chinese)
- [18] 王秀康, 邢英英, 张富仓. 膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (1): 141-150.
- WANG Xiukang, XING Yingying, ZHANG Fucang. Optimal amount of irrigation and fertilization under drip fertigation for tomato [J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47 (1): 141-150. (in Chinese)

(责任编辑 黄鑫鑫)

(上接第 618 页)

- [6] ZIELKE W. Frequency-dependent friction in transient pipe flow [J]. Journal of basic engineering, 1968, 90 (1): 109-115.
- [7] BRUNONE B, KARNEY B W, MECARELLI M, et al. Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow [J]. Journal of water resources planning and management, 2000, 126: 236-244.
- [8] TRIKHA A K. An efficient method for simulating frequency-dependent friction in transient liquid flow [J]. Journal of fluids engineering, 1975, 97: 97-105.
- [9] VARDY A E, BROWN J M B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows [J]. Journal of sound and vibration, 2003, 259 (5): 1011-1036.
- [10] VARDY A E, BROWN J M B. Transient turbulent friction in fully rough pipe flows [J]. Journal of sound and vibration, 2004, 270: 233-257.
- [11] VÍTKOVSKÝ J P, STEPHENS M L, BERGANT A, et al. Efficient and accurate calculation of Zielke and Vardy-Brown unsteady friction in pipe transients [C] // Proceedings of the 9th International Conference on Pressure Surges, 2004.
- [12] 刘冬, 张辉, 任刚, 等. 特征线法及其变体在水轮机及引水系统非线性建模中的对比研究 [J]. 水利学报, 2020, 51 (4): 448-457.
- LIU Dong, ZHANG Hui, REN Gang, et al. Comparative study of characteristic line method and its variants in nonlinear modeling of hydraulic turbine and water diversion system [J]. Journal of hydraulic engineering, 2020, 51 (4): 448-457. (in Chinese)
- [13] 刘平, 李博, 魏加富, 等. 黑麋峰抽水蓄能电站机组水力过渡过程仿真研究 [J]. 水利水电技术, 2019, 50 (S2): 111-115.
- LIU Ping, LI Bo, WEI Jiafu, et al. Simulative study on hydraulic transition process of pump-turbine unit in Heimifeng Pumped Storage Hydropower Station [J]. Water resources and hydropower engineering, 2019, 50 (S2): 111-115. (in Chinese)
- [14] 郭旖琪, 马立山, 王利民, 等. SWMM 模型参数敏感度分析应用研究 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2020, 38 (1): 133-137.
- GUO Yiqi, MA Lishan, WANG Limin, et al. Research on application of SWMM model parameter sensitivity analysis [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2020, 38 (1): 133-137. (in Chinese)
- [15] BERGANT A, SIMPSON A R, VÍTKOVSK J. Developments in unsteady pipe flow friction modelling [J]. Journal of hydraulic research, 2001, 39 (3): 249-257.

(责任编辑 朱漪云)