

水电站过渡过程中压力管道的电路等值模拟新方法

束洪春¹, 张加贝¹, 董俊²

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南省昆明市 650051;

2. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

New Method for Simulating Penstock by Equivalent Circuit Model in Transients of Hydro-plant

SHU Hong-chun¹, ZHANG Jia-bei¹, DONG Jun²

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, Yunnan Province, China; 2. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: This paper presents a π equivalent circuit model of penstock in hydro-plant based on the transient flow function of penstock. The whole conduit circuit model can be built by this proposed method using one or more π circuit model to express penstock in the research of transients. The method can be used to form the state block of flow and head from inflow to outflow for the fast modeling of penstock, which is easy for researcher to study the impact between hydraulics, mechanism and electricity. Comparisons between various lengths of penstock and different types of waterhammer using circuit equivalent method and characteristic method are presented by digital simulation. Results of digital simulation show that the proposed method is correct and effective.

KEY WORDS: hydro-plant; penstock; π equivalent circuit; characteristic method; transient; waterhammer

摘要: 根据有压管道的非恒定流方程建立水电站均匀压力管道的 π 型等值电路模型, 将不同长度的压力引水管道采用1个或多个 π 型模型等效, 从而得到整个引水管道的等值电路模型。新方法可用于压力管道的快速建模, 建立入流和出流2个断面的流量-水头压力的状态框图, 便于研究者构建整个水力系统的模型以研究水电站过渡过程中水机电之间的相互影响。最后对不同类型水击和不同长度的压力钢管进行仿真, 并将电路等值方法和特征线方法比较。仿真结果表明电路等值方法正确、有效。

关键词: 水电站; 压力管道; π 型等值电路; 特征线法; 过渡过程; 水击

基金项目: 国家自然科学基金项目(90610024, 50467002, 50347026); 云南省科技攻关项目(2003GG10); 云南省自然科学基金项目(2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (90610024, 50467002, 50347026).

0 引言

我国水电站的发展相当迅速, 在这些水电站中有相当一部分是引水式电站。当引水式水机组甩负荷或导叶启闭时, 在压力管道中将产生很大压力变化, 这便是水电站过渡过程或水击过程。到目前为止, 水电站过渡过程的数值仿真研究手段是依据1维有压管道非恒定流的基本方程, 结合机组、调压室、岔管、水库等边界条件进行计算^[1]。利用基本方程, 可解出压力管道中的水击过程, 其方法主要有^[2-3]: 解析算法、图解分析法、线性差分法和特征线法。其中应用最多的是特征线法, 这种方法可计入摩阻损失、精确度高, 可计算复杂的水力系统。但是特征线法编程复杂, 很难与电力系统仿真软件接口, 限制了它在电力系统稳定研究过程中的使用。因此在研究电力系统稳定时, 研究者通常采用比较简单的刚性水击模型来描述压力管道的水击过程^[4-8]。但文献[9-10]通过分析不同的水击模型, 指出如果压力管道水击模型使用不当, 将不能正确地反应出系统的实际情况。因此要精确地模拟水力系统对电力系统的影响, 水力系统应该采用弹性水击模型。文献[11-14]便采用不同方法和精度的模型来模拟管道内的弹性水击, 以研究水力系统对整个系统稳定性的影响和动态过程。

为使电力系统研究者能将压力管道中的复杂弹性水击影响计入电力系统稳定的研究中, 本文提出一种用 π 型二端口电路等效压力管道的方法, 此模型考虑了液体的压缩性和管道的弹性形变, 并能将水力系统的弹性水击影响计入到电力系统稳定

研究中。最后运用此方法对水电站的水击过程和模型的等效长度进行仿真研究。

1 压力管道非恒定流基本微分方程组和传递矩阵

当压力管道中阀门或导叶快速启闭时，管道内流速急速变化，由于水流惯性作用中压力管道内引起的压力上升和下降，可应用运动方程和连续方程来描述^[2]。当忽略管轴倾角的影响，一段均匀压力管道便如图 1 所示，其管道内非恒定流的运动方程和连续方程可表示为

$$\begin{cases} \partial H / \partial x + \partial Q / gA \partial t + fQ^2 / 2gDA^2 = 0 \\ a^2 \partial Q / gA \partial x + \partial H / \partial t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

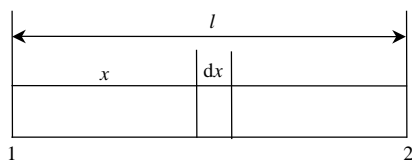


图 1 均匀压力管道
Fig. 1 Uniform penstock

对式(1)在额定工况点(\$Q_0, H_0\$)处线性化，并写成标么值形式，则有

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial x} + L_0 \frac{\partial q}{\partial t} + R_0 q = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial x} + C_0 \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中：\$h\$为水头增量，\$h = \Delta h(x, t) / H_0\$；\$q\$为流量增量，\$q = \Delta q(x, t) / Q_0\$；\$L_0\$为单位长度管道的流感，\$L_0 = Q_0 / gAH_0\$；\$C_0\$为单位长度管道的流容，\$C_0 = gAH_0 / a^2 Q_0\$；\$R_0\$为单位长度管道的流阻，\$R_0 = fQ_0^2 / gDA^2 H_0\$。

为得到 2 个断面之间的传递矩阵，对式(2)作拉普拉斯变换，令 \$H(x, s) = L[h(x, t)]\$，\$Q(x, s) = L[q(x, t)]\$，得

$$\begin{cases} (R_0 + L_0 s)Q(x, s) + \partial H(x, s) / \partial x = 0 \\ \partial Q(x, s) / \partial x + C_0 s H(x, s) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

通过式(3)可解出长度为 \$l\$ 的均匀压力管道首末流量—压力传递矩阵：

$$\begin{bmatrix} H_1(s) \\ Q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma l) & z_c \text{sh}(\gamma l) \\ z_c^{-1} \text{sh}(\gamma l) & \text{ch}(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中：\$\gamma = \sqrt{L_0 C_0 s^2 + R_0 C_0 s}\$；\$z_c = \sqrt{(R_0 + L_0 s) / (C_0 s)}\$。

2 压力管道的 \$\pi\$ 型等值电路和级联

由式(4)可确定管道上、下 2 个断面参数间的关

系。观察发现，压力管道内非恒定流的传递矩阵与忽略对地电导的均匀输电线的正向传输方程一致，因此可将管道中的流量和水头压力分别看成是输电线上的电流和电压。通过这样的等效，可将压力管道内非恒定流的传递函数用集中参数的 \$\pi\$ 型等值电路来模拟^[15]，等值电路如图 2 所示。

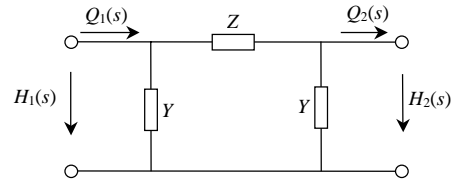


图 2 均匀压力管道的 \$\pi\$ 型等值电路
Fig. 2 \$\pi\$ equivalent circuit model of uniform penstock

根据二端口网络理论，\$\pi\$ 型等值电路中的阻抗和导纳可根据传递矩阵(4)求取

$$\begin{cases} Z = z_c \text{sh}(\gamma l) \\ Y = \frac{\text{ch}(\gamma l) - 1}{z_c \text{sh}(\gamma l)} \end{cases} \quad (5)$$

由于水击波速变化范围不大，研究水力系统对电力系统稳定影响时涉及的频率也较低，\$\gamma l\$ 的数值大小主要与管道长度有关。当管道长度较短时，可将 \$\gamma, z_c\$ 代入式(5)并化简为

$$\begin{cases} Z = R + Ls \\ Y = Cs / 2 \end{cases} \quad (6)$$

式中：\$L\$为管道全长流感，\$L=L_0 l\$；\$C\$为管道全长流容，\$C=C_0 l\$；\$R\$为管道全长流阻，\$R=R_0 l\$。管道流感是与水流惯性有关的参数，其大小与电站额定水头、压力管道长度、管道流速有关。管道流容是与弹性水击有关的参数，当水击波速\$a\$值取无穷大时，水击过程就是刚性水击。在刚性水击时，管道的流容为 0，断开图 2 中的并联支路就可得到刚性水击的管道等值电路图。管道流阻是与管道水力摩阻有关的参数，不同的管道材料和管道形状将会影响流阻的大小，管道流阻一般较小，在实际计算中可忽略。

压力管道的特性一般用水流惯性时间常数 \$T_w = lQ_0 / gAH_0\$ 和水击相长 \$T_r = 2l / a\$ 来描述，如果用它来表示流感和流容，则 \$L = T_w\$，\$C = T_r^2 / 4T_w\$。

上面所讨论的是一段较短的均匀压力管道，对于长距离的压力管道，应把管道分成若干段，每段用一个 \$\pi\$ 型等值电路来表示，再根据两端口的级联理论，将这些单元电路串联起来得到 \$N\$ 个 \$\pi\$ 型串联的链型等值电路。如果压力管道分为几个不等截面的管段或断面材料不同，也需要相应将这个压力管道分成 \$N\$ 个 \$\pi\$ 型等值电路来等效。

3 水电站水击计算的边界条件

为计算管道中的水击，必须先确定管道上下游的起始条件和边界条件。确定起始条件比较容易。当管道水流由稳定流转变为不稳定流时，把稳定流的终了看成不稳定流的开始。在不稳定流的过程中，边界条件应能确定管道每一个断面流速和水头的大小关系。对于引水系统没有设置调压井、简单布置的电站，可使用如下的边界条件：

(1) 管道进口边界条件。

水电站压力钢管的上游一般是水库或压力前池。水库的容量较大，可认为水库的水位不变。如果设管道上游是水位不变的水库，则管道进口的压头不变，在任意时刻 $\Delta h=0$ 。认为水库水位不变的常数是足够精确的^[16]。压力前池的水位变化情况取决于渠道调节的类型，自动调节的前池水位变化虽大，但是与管道水击计算时间相比，变化相对缓慢。非自动调节渠道水位变化较小，所以水击计算中也认为前池水位为不变的常数。

(2) 管道出口边界条件。

水电站压力管道末端的边界条件为水轮机。水轮机数学模型通常有基于外特性曲线模型和基于内特性解析模型等几种形式^[17]。本文采用非线性解析形式的水轮机模型，把水轮机流量与开度、水头的关系看成是阀门的关系^[17-19]。如果忽略流阻，则水轮机模型如图3所示。模型具体参数见文献[18]。

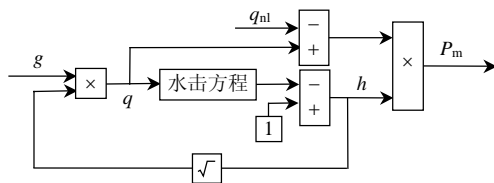


图3 水轮机非线性模型
Fig. 3 Nonlinear model of hydro turbine

4 数字仿真与分析

常规水电站的过渡过程比较多，但在水电站的调节保证计算和实际电站运行中，一般只出现首相水击和末相水击^[16,20]2种情况。本文应用Matlab的Simulink平台对一个简单压力管道就这两种不同类型的水击做了数字仿真，并将结果与Visual C++程序编制的特征线法做比较，然后对 π 型模型的等效精度做了分析。仿真示意图如图4所示。

(1) 首相水击。

首相水击一般出现在高水头电站甩满负荷时。假定导叶以直线规律关闭， T_s 为导叶直线关闭时间。

针对管长的不同，把压力管道用 N 个 π 型等值电路模型等效，以分析电路模型的等效长度和整体仿真模型的精度。仿真参数和结果见表1、2和图5。

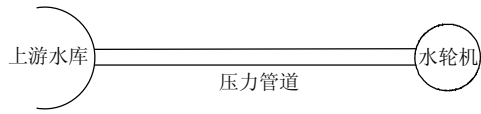


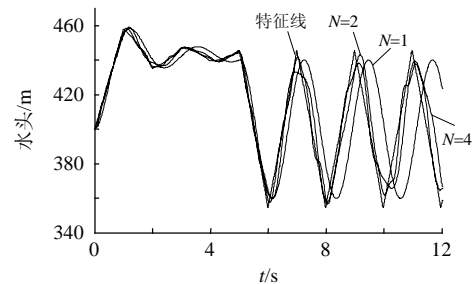
图4 仿真示意图
Fig. 4 Schematic diagram of simulation

表1 管长为500 m时首相水击仿真参数及结果
Tab. 1 Simulation parameters and result of first-phase-waterhammer at $l=500$ m

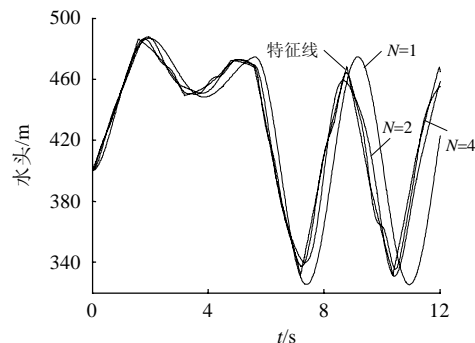
$a/(m/s)$	H_0/m	流速/(m/s)	T_s/s	
1000	400	4	5	
项目	特征线	等值电路		
		$N=1$	$N=2$	$N=4$
最大水头/m	458.17	458.92	458.30	458.20
发生时刻/s	1.00	1.22	1.20	1.12

表2 管长为1000 m时首相水击仿真参数及结果
Tab. 2 Simulation parameters and result of first-phase-waterhammer at $l=1000$ m

$a/(m/s)$	H_0/m	流速/(m/s)	T_s/s	
1000	400	4	7	
项目	特征线	等值电路		
		$N=1$	$N=2$	$N=4$
最大水头/m	458.17	458.92	458.30	458.20
发生时刻/s	1.00	1.22	1.20	1.12



(a) 管长500 m, 关闭时间5 s



(b) 管长1000 m, 关闭时间7 s

图5 不同长度压力管道的首相水击仿真曲线
Fig. 5 First-phase-waterhammer simulation curves for penstocks with various lengths

(2) 末相水击。

末相水击一般出现在低水头电站甩满负荷时，

其水击压力的最大值出现在第 1 相之后。假定导叶以 T_s 时间直线关闭。用上述同样的方法进行仿真，其仿真参数和结果见表 3、4 和图 6。

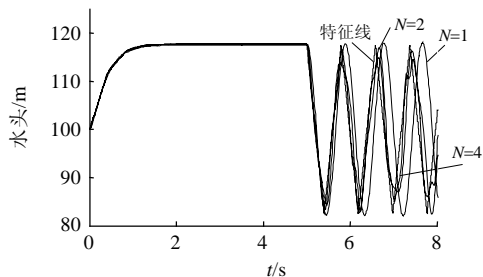
从上述 2 种不同水击的仿真可看出，等值电路方法与特征线方法的结果非常吻合，最大水头的相对误差不超过 0.5%。在导叶关闭之前等值电路方法与特征线方法所得到仿真数值结果吻合程度较高，导叶关闭后吻合程度相对较低。如果使用的等效 π 型模型个数较少，则水头压力值在时间上有一定的

表 3 管长为 200 m 时末相水击仿真参数及结果
Tab. 3 Simulation parameters and result of end-phase-waterhammer at $l=200$ m

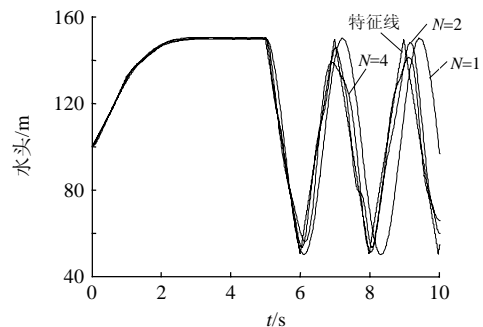
$a/(m/s)$	H_0/m	流速/(m/s)	T_s/s	
1 000	100	4	5	
项目	特征线	等值电路		
		$N=1$	$N=2$	$N=4$
最大水头/m	171.41	171.71	171.72	171.71
发生时刻/s	2.02	1.89	2.12	2.03

表 4 管长为 500 m 时末相水击仿真参数及结果
Tab. 4 Simulation parameters and result of end-phase-waterhammer at $l=500$ m

$a/(m/s)$	H_0/m	流速/(m/s)	T_s/s	
1 000	100	4	5	
项目	特征线	等值电路		
		$N=1$	$N=2$	$N=4$
最大水头/m	149.77	150.40	150.38	150.10
发生时刻/s	3.30	3.04	3.32	3.32



(a) 管长 200 m, 关闭时间 5 s



(b) 管长 500 m, 关闭时间 5 s

图 6 不同长度压力管道的末相水击仿真曲线
Fig. 6 End-phase-waterhammer simulation curves for penstocks with various lengths

滞后；使用更多的 π 型模型来等效压力管道，则产生水击峰谷值的时间也更加接近。对于相同长度的压力管道，使用的 π 型模型个数越多，等效精度越高，仿真曲线也更加逼近。

5 结论

通过分析压力管道内的非恒定流方程，本文将压力管道内非恒定流的传递矩阵用 π 型二端口电路来等效，将此方法用于电站过渡过程计算，并对模型等效长度和精度做了研究，得到如下结论：

(1) 针对不同的工程实际应用和过渡过程计算，可根据需要采用不同个数的 π 型模型来等效一段压力管道。如果将此方法应用在电站调节保证计算中，由于调保计算只要求计算水击压力的最大值，因此可采用 1 个或 2 个 π 型模型来近似等效压力管道。如果要研究水电站的暂态过程，则应使用更多的 π 型模型来等效压力管道以全面计入水力系统对电力系统稳定的影响。

(2) 如果管道较长或管道断面不均匀，则应使用多个 π 型模型来等效。采用越多的 π 型模型得到的等效精度越高，越能反映水力弹性水击的作用。一个 π 型电路模型等效压力管道的长度约为 200~400 m。

(3) 管道的电路等值方法建模简单直观，能充分反映弹性水击对水机电系统的影响，而且易于工程人员使用，精确度高。

参考文献

- [1] 吴荣樵, 陈鉴治. 水电站水力过渡过程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [2] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] 常近时. 水力机械装置过渡过程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [4] 余耀南. 动态电力系统[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [5] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真软件开发之三——电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 20-25.
Tang Yong, Song Xinli, Liu Wenzhuo, et al. Power system full dynamic simulation—part III: long term dynamic models[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 20-25(in Chinese).
- [6] De Jaeger E, Janssens N, Malfliet B, et al. Hydro turbine model for system dynamic studies[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(4): 1709-1715.
- [7] Hagihara S, Yokota H, Goda K, et al. Stability of a hydraulic turbine generating unit controlled by PID governor[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2994-2998.
- [8] Hannet L N, Feltes J W, Fardanesh B, et al. Modeling and control tuning of a hydro station with units sharing a common penstock section[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(4): 1407-1414.
- [9] 陈舟, 陈寿孙, 张中华, 等. 水力系统模型对电力系统暂态稳定

- 分析的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 6(7): 13-18.
Chen Zhou, Chen Shousun, Zhang Zhonghua, et al. Effect of hydraulic system models on power system transient stability analysis [J]. Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech., 1996, 6(7): 13-18(in Chinese).
- [10] 陈舟, 刁勤华, 陈寿孙, 等. 水力系统模型对电力系统低频振荡分析的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1996, 36(7): 67-72.
Chen Zhou, Diao Qinhu, Chen Shousun, et al. The influence of hydraulic system models to the low frequency of power system [J]. Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech., 1996, 36(7): 67-72(in Chinese).
- [11] Kishor N, Saini R P, Singh S P. Most appropriate rationalized transfer function with elastic water column effect[C]. Instrumentation and Control Engineering Conference, NIT, Tiruchirappalli, India, 2003.
- [12] Souza O H. Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(4): 1269-1272.
- [13] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [14] 李艳军, 刘宪林. 考虑水力系统详细模型的电力系统暂态过程仿真[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 61-64.
Li Yanjun, Liu Xianlin. Power system transient simulation considering detailed models of hydraulic system[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 61-64(in Chinese).
- [15] 陈崇源. 高等电路[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [16] 王树人, 董毓新. 水电站建筑物[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [17] 高慧敏, 刘宪林, 徐政. 水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 5-8.
Gao Huimin, Liu Xianlin, Xu Zheng. Effect of detailed hydro turbine models on analysis results of power system transient stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 5-8(in Chinese).
- [18] IEEE Working Group. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1992, 7(1): 167-179.
- [19] 凌代俭, 沈祖谥. 水轮机调节系统的非线性模型、PID 控制及其 Hopf 分叉[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 97-102.
Ling Daijian, Shen Zuyi. The nonlinear model of hydraulic turbine governing systems and its PID control and Hopf bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 97-102(in Chinese).
- [20] 沈祖谥. 水轮机调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

收稿日期: 2007-10-10.

作者简介:

束洪春(1961—), 男, 博士后, 教授, 院长, 博士生导师, 从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等方面的教研工作, kmshc@sina.com;

张加贝(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水机电模型及水机电系统暂态过程等。

(编辑 谷子)