

文章编号:0559-9350(2016)04-0566-09

## 地下式水电站调压室交通洞过渡过程中的风速模拟

陈闯闯, 杨建东, 郭文成

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 在考虑气体可压缩性的基础上, 建立了地下式水电站调压室交通洞过渡过程中的气体运动数学模型, 依据气体管道瞬变流的特征线法, 提出了风速模拟的方法并编制了完整的模拟程序, 通过与试验结果的对比如验证了所提求解方法与模拟程序的适用性与合理性。然后分析了交通洞的体型(长度、断面积、倾角)对风速发展、分布及波动过程的影响, 并从波动叠加的角度揭示了各因素的作用机理。结果表明: 对于地下式水电站调压室交通洞在过渡过程中的风速的模拟, 考虑气体可压缩性是必要的。交通洞断面的风速波动过程由低频质量波(基波)与高频弹性波(谐波)叠加而成。通气洞长度影响谐波的振幅和周期、断面积影响基波和谐波的振幅、倾角则仅影响谐波的振幅。

**关键词:** 地下式水电站; 调压室交通洞; 过渡过程; 风速; 气体可压缩性; 波动叠加; 数值模拟

**中图分类号:** TV732

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20150721

## 1 研究背景

对于地下式水电站, 通常设置修建在山体中的开敞式调压室, 调压室的通风、减压功能是通过交通洞来实现。在水电站过渡过程中, 机组启动、增负荷、减负荷、甩负荷等动作都将引起调压室内水位上下波动, 使洞内产生较大的风速。风速的大小关系到交通洞的安全使用和工程投资, 因此需对风速进行精确模拟。

对于调压室交通洞在过渡过程中风速的模拟研究, 前人进行了初步的探讨。文献[1-2]通过物理模型试验对地下式水电站调压室通气洞内的风速进行了测定, 阐明了调压室内的涌浪过程与通气洞内风速变化过程的关联性 & 风速发展的特征。文献[3-4]采用CFD方法探讨了尾导结合尾水洞的通气系统的作用机理。模型试验和CFD模拟是研究本文问题的可行方法, 但高精度、快速、高效的一维数值模拟方法与模拟程序同样必不可少。对于本文的研究对象, 调压室水位波动引起交通洞内气体运动, 调压室的边界条件如何处理、调压室水位波动与交通洞内气体非恒定流动如何准确耦合, 都是该领域内研究人员尚未涉及与解决的关键问题。虽然文献[5]研究了天然气管路的瞬变流, 建立了相应的基本方程并给出了一维特征线解法, 但其研究对象、边界条件与调压室交通洞相差过大, 具体来说: (1)天然气管路的瞬变流是一个非常缓慢的瞬变过程, 一般历时可达4~5d, 而调压室交通洞的瞬变流相对快速, 一般历时在几分钟至几十分钟, 两者时间尺度上的差异导致在进行特征线法时间增量的处理上显著不同; (2)天然气管路的瞬变流中的核心边界条件是压缩机, 而调压室交通洞的瞬变流则是调压室; 故其结论并不能应用于本文的研究对象。

本文针对地下式水电站调压室交通洞, 建立了气体非恒定流的基本方程及特征线解法, 并推导出气体密度与压强、压缩性系数的关系, 据此将气体的可压缩性引入求解过程; 给出了相应的边界

收稿日期: 2015-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379158); 国家留学基金委公派留学基金项目(201506270057)

作者简介: 陈闯闯(1991-), 男, 河南南阳人, 硕士生, 主要从事水电站过渡过程与控制研究。

E-mail: chenchuang@whu.edu.cn

通讯作者: 郭文成(1988-), 男, 安徽阜阳人, 博士生, 主要从事水电站过渡过程与控制研究。E-mail: wench@whu.edu.cn

条件和初始条件的处理方法。然后提出了过渡过程中调压室交通洞内气体风速的模拟方法并编制了完整的模拟程序；结合算例，通过与试验结果的对比验证了所提求解方法与模拟程序的适用性与合理性。最后采用本文提出的模拟方法与模拟程序，重点分析了交通洞的体型(包括长度、断面积、倾角)对风速发展、分布及波动过程的影响，并从波动叠加的角度揭示了各因素的作用机理。

## 2 数学模型

对于地下式水电站调压室交通洞中空气流动速度的模拟属于气体管道瞬变流的范畴，所采用的计算方法与液体管道瞬变流类似，同样需要首先建立非恒定流的基本方程(连续方程、动量方程)。在方程建立之前，针对气体管道瞬变流的特殊性做如下假设：(1)流动是等温的；(2)管壁的弹性可以忽略；(3)流动是一维的；(4)摩擦系数是壁面粗糙度及雷诺数的函数，在瞬变流计算中采用定常运动的摩擦系数；(5)沿着管道的动能的变化可以忽略。

**2.1 基本方程及特征线法求解** 气体管道瞬变流的基本方程已在文献[5-7]中建立，本文直接采用：连续方程：

$$\frac{B^2}{A} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

动量方程：

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\alpha^2}{A} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{pg \sin \theta}{B^2} + \frac{fB^2 M |M|}{2DA^2 p} = 0$$

式中： $M$ 为质量流量； $v$ 为流速； $p$ 为气体绝对压力； $B$ 为波速； $\theta$ 为管道断面形心连线与水平面的夹角； $g$ 为重力加速度； $\alpha$ 为惯性因子； $f$ 为Darcy-Weisbach摩擦系数。其中：(1) $M = \rho v A$ ；(2)波速可由状态方程计算得到： $B = \sqrt{p/\rho} = \sqrt{zRT}$ ， $\rho$ 为气体密度， $z$ 为压缩性系数， $R$ 为气体常数， $T$ 为绝对温度；(3)当交通洞断面中心连线沿 $+x$ 方向升高时， $\theta$ 取正值；(4)参数取值： $\rho_0 = 1.205 \text{ kg/m}^3$ ， $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ ， $f = 0.015$ ， $\alpha = 1$ ，惯性因子 $\alpha$ 是为了加快计算用的，本文不需要加快计算，故其值取为1。

由文献[5]知，在气体管道瞬变流中，压缩性系数 $z$ 在温度及压力变化很大时，压缩性系数 $z$ 发生微小变化(1.0至1.08之间)，在任何给定的瞬变流问题中，普遍应用 $z$ 的平均值，本文在波速处理时，若绝对温度 $T$ 不变， $R$ 为气体常数其值不变， $B = \sqrt{p/\rho} = \sqrt{zRT}$ ，由于 $z$ 变化很小，因而波速趋于定值。依据文献[8-11]对于特征线法的论述，建立如图1所示的固定特征线网格，沿着正特征线 $\frac{dx}{dt} = -\frac{B}{\alpha}$ 、负特征线 $\frac{dx}{dt} = \frac{B}{\alpha}$ 可得正、负特征线方程(分别以 $C^+$ 、 $C^-$ 表示)：

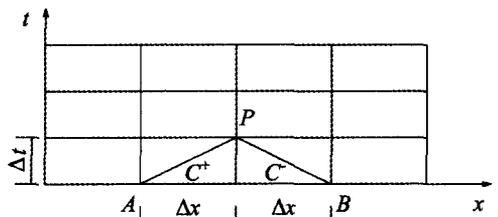


图1 特征网格与特征线

$$C^+ \begin{cases} \frac{\alpha^2}{A} \frac{dM}{dt} + \frac{\alpha}{B} \frac{dp}{dt} + \frac{pg \sin \theta}{B^2} + \frac{fB^2 M |M|}{2DA^2 p} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = \frac{B}{\alpha} \end{cases}; C^- \begin{cases} \frac{\alpha^2}{A} \frac{dM}{dt} - \frac{\alpha}{B} \frac{dp}{dt} + \frac{pg \sin \theta}{B^2} + \frac{fB^2 M |M|}{2DA^2 p} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -\frac{B}{\alpha} \end{cases}$$

利用沿特征线积分( $C^+$ :  $A \rightarrow P$ ,  $C^-$ :  $B \rightarrow P$ )的方法可得 $C^+$ 方程、 $C^-$ 方程：

$$C^+ : p_P = C_P - C_B M_P$$

$$C^- : p_P = C_M + C_B M_P$$

进而可得 $P$ 点的压力和质量流量：

$$p_P = \frac{C_P + C_M}{2}; M_P = \frac{C_P - C_M}{2C_B} \quad (1)$$

式中:  $C_p = p_A + \frac{\alpha B}{A} M_A - \left( \frac{p_A g \sin \theta}{\alpha B} + \frac{f B^3 M_A |M_A|}{2 \alpha D A^2 p_A} \right) \Delta t$ ,  $C_M = p_B - \frac{\alpha B}{A} M_B + \left( \frac{p_B g \sin \theta}{\alpha B} + \frac{f B^3 M_B |M_B|}{2 \alpha D A^2 p_B} \right) \Delta t$ ,  $C_B = \frac{\alpha B}{A}$ 。

**2.2 气体密度与压力、压缩性系数的关系推求** 针对本文模拟的调压室交通洞的瞬变流过程, 根据瞬变过程快速的特点, 需考虑气体可压缩性的影响。故本节进行调压室交通洞过渡过程中的气体密度与压力、压缩性系数的关系推求。

气体状态方程:

$$p = z \rho R T \quad (2)$$

考虑气体可压缩性, 将式(2)左边对压强  $p$ 、右边对气体压缩系数  $z$  和密度  $\rho$  求全微分, 得:

$$dp = \rho R T dz + z R T d\rho \quad (3)$$

结合气体压缩性系数  $z = \frac{pV}{RT}$ 、气体比容  $V = \frac{1}{\rho}$  的表达式, 将式(3)进行离散化处理, 可得任一时刻  $t$  的压力、密度(分别用  $p$ 、 $\rho$  表示)与其前一计算时刻  $t - \Delta t$ (分别用  $p_{-\Delta t}$ 、 $\rho_{-\Delta t}$  表示)间的递推关系:

$$p - p_{-\Delta t} = 2\rho p V - \rho p_{-\Delta t} V_{-\Delta t} - \rho_{-\Delta t} p V \quad (4)$$

整理式(4)可得:

$$p_{-\Delta t} \rho^2 - (p + p_{-\Delta t}) \rho_{-\Delta t} \rho + \rho_{-\Delta t}^2 p = 0 \quad (5)$$

求解式(5), 可得  $\rho$  的计算式:

$$\rho_1 = \frac{(p + p_{-\Delta t}) \rho_{-\Delta t} + \sqrt{[(p + p_{-\Delta t}) \rho_{-\Delta t}]^2 - 4 p_{-\Delta t} \rho_{-\Delta t}^2 p}}{2 p_{-\Delta t}}; \quad \rho_2 = \frac{(p + p_{-\Delta t}) \rho_{-\Delta t} - \sqrt{[(p + p_{-\Delta t}) \rho_{-\Delta t}]^2 - 4 p_{-\Delta t} \rho_{-\Delta t}^2 p}}{2 p_{-\Delta t}} \quad (6)$$

当断面压力大于前一时刻压力时, 计算  $\rho_1$ ; 当断面压力小于前一时刻压力时, 计算  $\rho_2$ 。

当由式(1)求得任一断面、任一时刻的压力  $p$  和质量流量  $M$  后, 便可根据式(6)并结合前一时刻的压力和密度求出该时刻的密度  $\rho$ , 进而根据  $M = \rho v A$  求出该时刻的风速  $v$ , 然后继续进行下一时刻的求解。

### 2.3 边界条件与初始条件

**2.3.1 边界条件** “调压室-交通洞”系统的边界条件包括交通洞接大气端、串联管及调压室端边界条件。根据本文的研究要求与研究对象的特殊性, 提出各边界条件的处理方法, 分别如下:

(1)交通洞接大气端。直接与大气相接的边界, 其压力恒为大气压力, 即  $p_p = p_0$ 。应用  $C^-$  方程, 可得此边界结点的未知量  $M_p$ :

$$M_p = \frac{p_0 - C_M}{C_B} \quad (7)$$

(2)串联管。串联管连接处应满足质量流量连续条件, 同时忽略连接处的局部损失, 则还应满足压力相等条件, 见图2。运用  $C^+$  方程和  $C^-$  方程, 可得到串联管边界条件:

$$p_P = \frac{C_{B1} C_{M2} + C_{B2} C_{P1}}{C_{B1} + C_{B2}}; \quad M_P = \frac{C_{P1} - C_{M2}}{C_{B1} + C_{B2}} \quad (8)$$

(3)调压室端。调压室水位波动作为扰动源引起调压室及交通洞内气体的非恒定流动。在本文中, 令调压室水位波动过程已知, 即  $z = z(t)$ , 初始水位为零点、以向上为正, 见图3。

假定: 调压室水面以上气体的高度值  $h_j$  一般较小, 且远远小于交通洞的长度, 故假定在过渡过

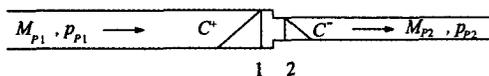


图2 串联管边界条件

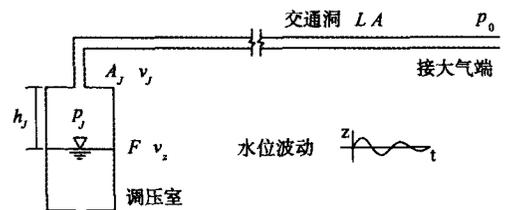


图3 调压室端边界条件

程中, 此段气体部分的密度均相等, 且等于交通洞在调压室端边界处的气体密度。根据此假定, 可得水位波动的速度  $v_z$  与边界断面处的气体流速  $v_j$  满足以下关系:

$$v_z F = v_j A_j$$

其中:  $F$  为调压室断面积,  $A_j$  为通气洞在调压室端边界处的断面积。

再结合  $v_z = -\frac{dz}{dt}$ 、 $M_j = \rho v_j A_j$  可得:

$$M_j = -\rho F \frac{dz}{dt} \quad (9)$$

应用  $C^+$  方程, 可得此边界处的未知量  $p_j$  的值:  $p_j = C_p - C_b M_j$ 。

对于式(9)中的密度  $\rho$  的说明: 密度是随压力变化的参数, 每个时间点密度都不相同。根据 2.2 节的分析可知, 任意时刻  $t$  的密度是在已知该时刻压力的前提下求解出的, 而时刻  $t$  的边界条件式(9)需要用到该时刻的密度(但该密度此时是未知的); 由于在  $\Delta t$  时段(0.01s 左右)内同一断面密度变化很小, 因此对于此问题, 本文采用错时  $\Delta t$  的方法进行处理, 即: 由  $t=0$  时刻采用该时刻的密度(即初始密度), 0 时刻之后的任意时刻  $t$  采用其前一时间  $t-\Delta t$  的密度代入式(9)进行计算。

2.3.2 初始条件 对于定常等温流动,  $M$  为常数,  $\frac{\partial M}{\partial t} = 0$ 。此时将动量方程从  $x=0$ 、 $p=p_1$  到  $x=\Delta x$ 、 $p=p_2$  积分, 整理可得:

$$p_2^2 = \left( p_1^2 - \frac{fB^2 M |M| \Delta x}{DA^2} \frac{e^s - 1}{s} \right) / e^s \quad (10)$$

式中  $s = (2g\Delta x \sin \theta) / B^2$ 。此式给出定常状态的抛物线压强梯度, 管道初始恒定状态各点的压强值都要满足此式, 称为定常状态方程。对于水平管线,  $s=0$ 、 $e^s=1$ 、 $(e^s - 1) / s = 1$ , 此时式(10)可以变为:

$$p_2^2 = p_1^2 - \frac{fB^2 M |M| \Delta x}{DA^2} \quad (11)$$

对于初始状态管道内的气体处于静止的情况, 各断面的流量均为零, 管道内各点的压强处处等于外界大气的压强值。

### 3 模拟方法与结果验证

3.1 模拟方法与模拟程序 依据以上建立的气体瞬变流的数学模型及固定特征线求解方法, 结合针对本文的研究对象而提出的边界条件与初始条件, 对地下式水电站在启动、增负荷、减负荷、甩负荷等过渡过程中调压室交通洞中的气体的风速进行模拟, 并采用 C++ 语言进行计算机编程, 建立地下式水电站调压室交通洞过渡过程中的风速模拟程序。模拟方法与模拟程序的计算过程为: (1) 将交通洞划分为若干个计算子管段, 子管段划分方法: 各管段长度  $\Delta L = B \times \Delta t$ ,  $\Delta t$  为计算时间步长, 长度为  $L$  的交通洞可以划分为  $n = L / \Delta L$  段, 同时形成  $n+1$  个断面; (2) 管道内部气体流量和压力的计算: 对管道内部任一计算断面, 根据  $t=0$  时刻的边界条件与初始条件, 计算中间变量  $C_p$ 、 $C_M$ 、 $C_b$  的值, 由式(1)计算  $t+\Delta t$  时刻的质量流量  $M_p$  和压力  $p_p$ ; (3) 上游边界结点流量和压力的计算: 上游边界结点(通大气端)外无结点, 因此只能采用  $C^+$  方程, 大气压力作为上游已知边界条件; (4) 下游边界结点流量和压力的计算: 下游边界结点(连接调压室端)外无结点, 采用  $C^-$  方程, 边界条件采用调压室端给定流量方程的方法  $M_{j0} = M_j(t)$ ; (5) 在  $t+\Delta t$  时刻每一网格结点上的变量值以及上、下游边界变量值计算已知后, 再进行  $t+2\Delta t$  时刻变量的计算, 并以此类推, 计算至所需时长为止。

程序计算模拟流程图如图 4。

3.2 结果验证 为了验证本文提出的地下式水电站调压室交通洞气体风速模拟方法与模拟程序的正确性, 采用本文方法与模拟程序对文献[1]中的试验模型与试验工况进行模拟(文献[1]已将试验数据换算

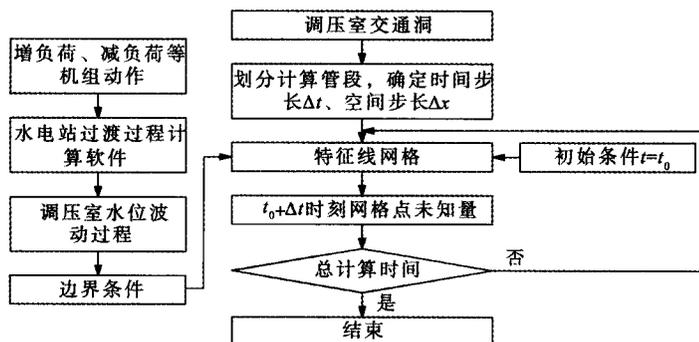


图4 地下式水电站调压室交通洞风速模拟流程图

成原型数据), 并将模拟结果与试验结果对比, 然后分析得出相应结论。首先根据试验模型建立如图5所示的计算模型, 模型对应电站的结构型式与体型参数如下:

结构型式: 电站采用地下首部式布置, 共6台机组, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>机组尾水进入1<sup>#</sup>调压室, 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>机组尾水进入2<sup>#</sup>调压室, 1<sup>#</sup>调压室和2<sup>#</sup>调压室顶部采用宽顶堰的连接方式进行衔接, 当尾水位较高时可形成一个大的长条形调压室, 使6台机组联合运行; 当尾水位较低时, 调压室单独运行互不干扰。

体型参数: 1<sup>#</sup>调压室长度  $L_1=92.9\text{m}$ , 宽度  $B_1=19.5\text{m}$ , 高度  $H_1=58.1\text{m}$ ; 2<sup>#</sup>调压室长度  $L_2=92.9\text{m}$ , 宽度  $B_2=19.5\text{m}$ , 高度  $H_2=65.3\text{m}$ ; 交通洞长度  $L=431.98\text{m}$ , 断面积  $A=56.50\text{m}^2$ 。

本文选取文献[1]中的2个典型试验工况进行模拟, 2个工况的机组动作如表1所示, 对应的调压室水位波动试验结果如图6所示。

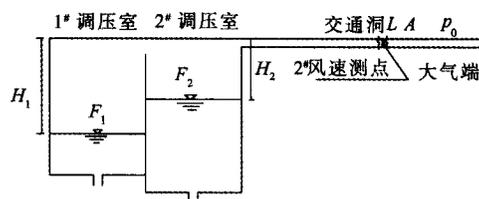
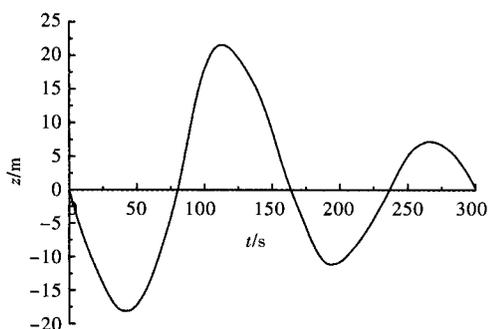


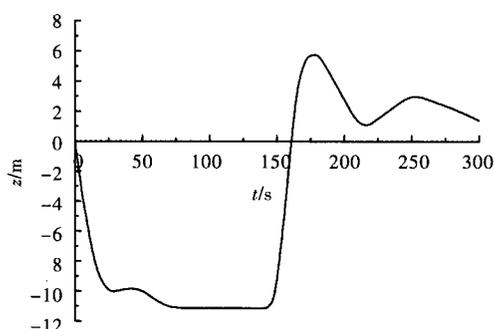
图5 计算模型

表1 计算工况

工况编号	工况机组动作说明
工况1	1 <sup>#</sup> 调压室对应的3台机组运行突甩全负荷、然后再增全负荷, 2 <sup>#</sup> 调压室对应的3台机组停机
工况2	2 <sup>#</sup> 调压室对应的3台机组运行突甩全负荷、然后再增全负荷, 1 <sup>#</sup> 调压室对应的3台机组停机



(a)工况1



(a)工况2

图6 工况1、2对应的调压室水位波动试验结果

将图6所示的调压室水位波动试验结果作为已知边界条件, 进行工况1、2风速的模拟, 其中一维程序计算所得的风速为断面平均风速, 与文献[1]中的试验结果  $V_{cp}$  对比, 结果如图7所示(对比断面为图5中2<sup>#</sup>风速测点所在断面)。

分析图7可知: (1)对于工况1、2下的风速波动过程, 本文方法模拟结果与试验结果的规律是一致的(包括周期、振幅、衰减度等); 从初始零时刻开始, 调压室内水位下降, 开始有水位波动, 水位波动作为扰动源引起通气系统内产生风速, 因而风速从初值为零开始波动变化, 并在很短时间内达到第一个极值。(2)本文方法模拟得到的断面风速与文献[1]中试验得到的风速的极值对比如表2。

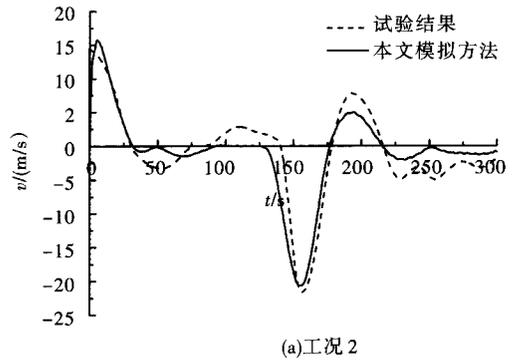
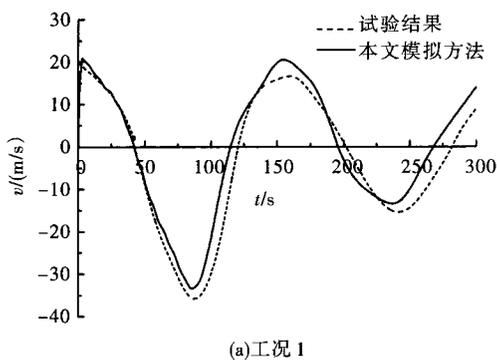


图7 风速模拟结果与试验结果的对比

表2 断面风速极值对比

对比项	最大排气风速/(m/s)		最大吸气风速/(m/s)		对试验结果的相对误差/%			
	$v < 0$		$v > 0$		排气		吸气	
	工况1	工况2	工况1	工况2	工况1	工况2	工况1	工况2
试验结果	36.62	21.70	19.76	14.53	工况1	工况2	工况1	工况2
本文方法模拟结果	33.89	20.52	20.64	15.34	-8.06	-5.75	4.26	5.28

从表2可以看出,本文方法模拟结果的最大排气风速( $v < 0$ )和最大吸气风速( $v > 0$ )较接近试验结果,相对误差在8%以内,精度较高。

综上所述,本文提出的地下式水电站调压室交通洞气体风速模拟方法与模拟程序可以准确地模拟调压室交通洞在过渡过程中的风速。

#### 4 影响因素分析

上文通过与文献中模型试验结果对比验证了本文风速模拟方法与模拟程序的正确性与精度,对于本文提出的风速模拟方法与模拟程序,即气体具有可压缩性,气体压强变化会引起密度时刻变化,如果不考虑气体可压缩性,认为整个过程中气体密度始终保持不变,模拟的精度将会较大程度地降低,故从计算精度的角度考虑,气体可压缩性的考虑是必要的。

**4.1 交通洞体型参数的影响分析** 对于“调压室-交通洞”系统,交通洞的体型(具体参数包括:长度、断面积、倾角)对风速的分布及波动过程的发生发展有着显著影响。调压室内水位波动过程如图9所示(注:沿交通洞轴线方向,规定断面A为首断面、断面D为末断面,风速方向定义为以从首断面A流向末断面D为正向,反之则为负向)。采用本文模拟方法与模拟程序,以以下模型(图8、图9所示)为依托对交通洞长度、断面积、倾角的影响进行分析。

**4.2 交通洞长度的影响** 计算模型基本参数如下:调压室断面积  $700 \text{ m}^2$ ,交通洞断面积  $20 \text{ m}^2$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,水平管道长度分别给定  $L=200 \text{ m}$ 、 $600 \text{ m}$ 、 $1000 \text{ m}$ ,进行模拟计算。不同通气洞长度下的沿通气洞轴线的正、负向风速极值包络线、典型断面(首断面、末断面)的风速波动过程的模拟结果见图

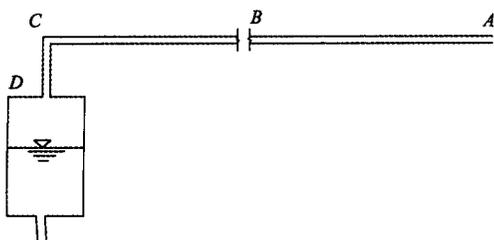


图8 计算模型及典型断面布置

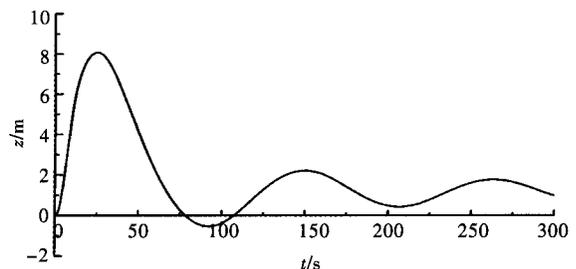


图9 调压室内水位波动过程

10, 其中, 图 10(c)中的小图是 250~300s 时间段的风速波动过程放大图, 下同。

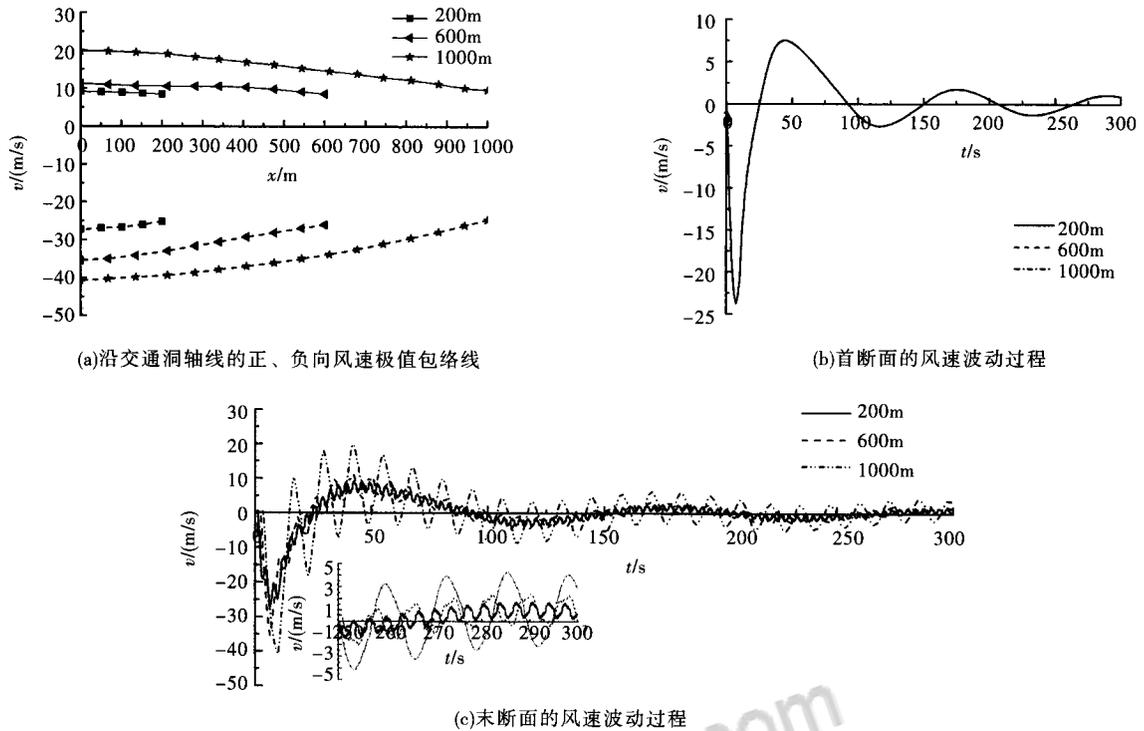


图 10 交通洞长度对风速的影响

由图 10 分析可知: (1)不同长度的交通洞首断面处的正、负向风速极值相同, 且风速的波动过程曲线相互重合; 沿交通洞轴线方向, 不同长度下的正、负向风速极值的绝对值均呈接近线性的渐增趋势; 末断面处的正、负向风速极值的绝对值随着长度的增大而增大。(2)随着交通洞长度的增大, 不同断面处风速波动的基波维持不变(断面的质量流量保持不变), 而谐波的振幅(因为长度越大断面交通洞内气体的惯性越大)和周期( $4L/B$ )均在显著增大, 叠加的结果使断面风速极值的绝对值不断增大。

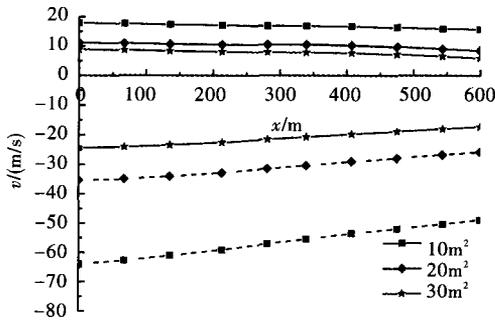
**4.3 交通洞断面积的影响** 基本参数如下: 调压室断面积  $700 \text{ m}^2$ , 通气洞水平管道长度  $L=600 \text{ m}$ ,  $\theta=0^\circ$ , 通气洞断面积分别给定  $10 \text{ m}^2$ 、 $20 \text{ m}^2$ 、 $30 \text{ m}^2$ , 利用本文程序进行模拟计算, 结果如图 11 所示。

分析图 11 可得: 随着交通洞断面积的增大, 同一断面处的风速波动的基波周期保持不变、振幅逐渐减小(因为质量流量相同时断面积越大流速越小), 谐波的周期也保持不变(仅取决于洞长和波速)、但振幅逐渐增大(因为断面积越大断面交通洞内气体的惯性越大), 但由于基波振幅的减小起主导作用, 故叠加后的风速正向、负向的极值绝对值仍随断面积的增大而减小。

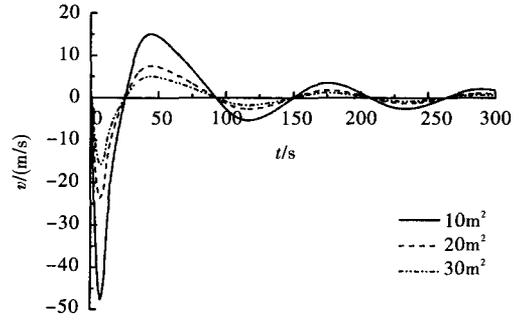
**4.4 交通洞倾角的影响** 基本参数如下: 调压室断面积  $700 \text{ m}^2$ , 通气洞水平管道长度  $L=600 \text{ m}$ , 通气洞断面积  $F=20 \text{ m}^2$ , 倾角  $\theta=0^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $90^\circ$ , 利用本文程序进行模拟计算, 结果如图 12 所示。

分析图 12, 与交通洞长度的影响类似: (1)不同倾角的交通洞首断面处的正、负向风速极值相同, 且风速的波动过程曲线相互重合; 沿交通洞轴线方向, 不同长度下的正、负向风速极值的绝对值均呈接近线性的渐增趋势; 末断面处的正、负向风速极值的绝对值随着倾角的增大而增大。(2)随着交通洞倾角的增大, 不同断面处风速波动的基波维持不变, 而谐波的周期保持不变、振幅不断增大(因为随着倾角的增大, 气体的重力分量会逐渐加大其在轴线运动方向上的惯性), 叠加的结果使断面风速的极值的绝对值不断增大。

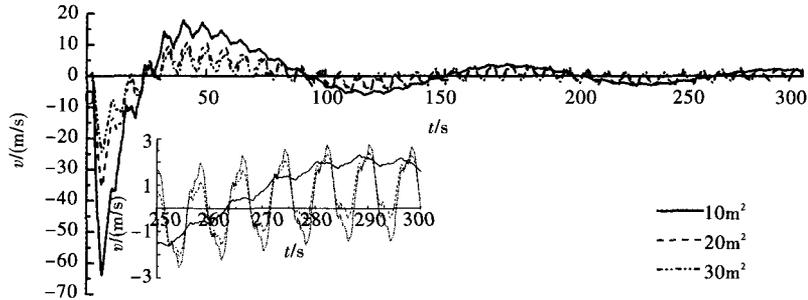
分析总结: 本节从波动叠加的角度揭示了交通洞长度、断面积和倾角对交通洞在过渡过程中的风速的影响机理。通气洞长度影响谐波的振幅和周期、断面积影响基波和谐波的振幅、倾角则仅影响谐波的振幅。



(a)沿交通洞轴线的正、负向风速极值包络线

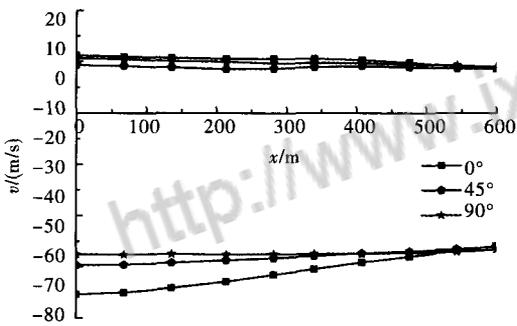


(b)首断面的风速波动过程

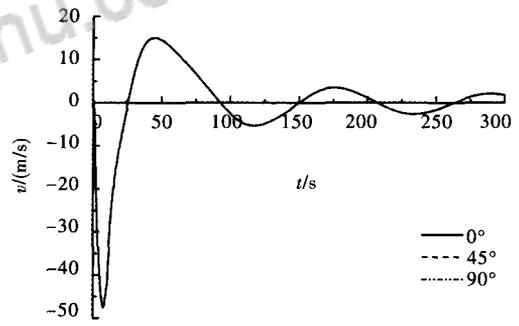


(c)末断面的风速波动过程

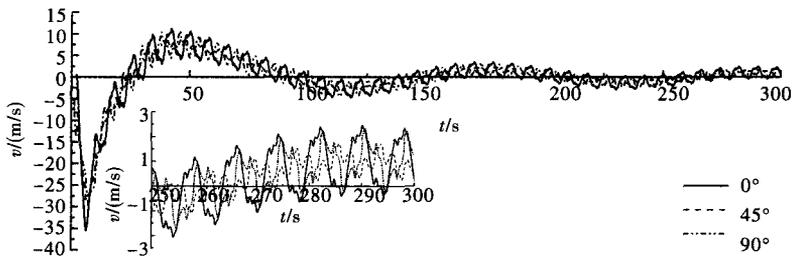
图 11 交通洞断面积对风速的影响



(a)沿交通洞轴线的正、负向风速极值包络线



(b)首断面的风速波动过程



(c)末断面的风速波动过程

图 12 交通洞倾角对风速的影响

## 5 结论

本文在考虑气体可压缩性的基础上，建立了地下式水电站调压室交通洞过渡过程中的气体运动数学模型，提出了风速模拟的方法并编制了完整的模拟程序，通过与试验结果的对比验证了所提求解方法与模拟程序的适用性与合理性。然后分析了交通洞的体型(长度、断面积、倾角)对风速发展、分布及波动过程的影响，并从波动叠加的角度揭示了各因素的作用机理。主要结论如下：(1)采用本文提出一维数值模拟方法与模拟程序可以准确地模拟地下式水电站调压室交通洞在过渡过程中

的风速。(2)对于地下式水电站调压室交通洞在过渡过程中的风速的模拟,考虑气体可压缩性是必要的。交通洞断面的风速波动过程由低频基波与高频载波叠加而成。其中,低频基波是由调压室水位波动引起的,性质上属于质量波,周期即为调压室水位波动周期、振幅受水位波动速度和交通洞内的质量流量大小共同影响;高频谐波是由气体的弹性引起的,运动的气体遇到出口处的大气被反射回通气洞,性质上属于弹性波,波动周期( $4L/B$ )与长度成正比、振幅与交通洞内的气体惯性大小成正比,且振幅沿洞轴线由断面A至断面D逐渐增大(断面A为0)、随时间逐渐减小。(3)通气洞长度影响谐波的振幅和周期、断面积影响基波和谐波的振幅、倾角则仅影响谐波的振幅。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 许景贤. 地下式水电站调压室交通洞风速试验[J]. 天津大学学报, 1994, 27(2): 224-231.
- [ 2 ] 许景贤, 桂竹君. 水电站地下式厂房长尾水洞设置通气孔的试验研究[J]. 水力发电学报, 1986(3): 78-89.
- [ 3 ] 周俊杰, 杨建东, 王焯. 采用CFD方法探讨尾水洞通气系统的作用机理[J]. 中国农村水利水电, 2012, (7): 171-175.
- [ 4 ] 刘敏, 蔡付林, 张雯, 等. 通气孔对具有明满流尾水隧洞过渡过程的影响[J]. 中国农村水利水电, 2014, (2): 150-156.
- [ 5 ] Streeter V L, Wylie E B. Fluid Transients[M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1978.
- [ 6 ] Guo W C, Yang J D, Chen J P, et al. Effect mechanism of penstock on stability and regulation quality of turbine regulating system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(2014): 1-13.
- [ 7 ] Chaudry M H. Applied Hydraulic Transients[M]. 3rd ed. New York: Van Nostrand, 2014.
- [ 8 ] 李江云. 气液活塞泵数值计算的修正特征线法[J]. 水利学报, 2002(6): 72-76, 82.
- [ 9 ] 郑源, 张健, 索丽生, 等. 输水管道水流对截留气团的冲击[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1365-1370.
- [ 10 ] 杨晓东, 朱满林, 李郁侠. 装有进排气阀的长距离压力输水系统水锤计算研究[J]. 水利学报, 1998(S1): 60-64.
- [ 11 ] 梁思振, 张昌兵, 葛静. 电站引水系统面向对象的非恒定流建模与应用研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 147-151.

## Simulation of wind speed in the traffic cave of surge tank of underground hydropower station in transient process

CHEN Chuangchuang, YANG Jiandong, GUO Wencheng

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** This paper presents a mathematical model established for the simulation of gas movement in the traffic cave of surge tank on the basis of considering the compressibility of gas, and proposes a wind speed simulation method and simulation program according to the characteristics line method of the gas transient flow in the pipe. The applicability and rationality of the proposed method and program has been verified by comparing with the experimental results. Then the influences of traffic cave size (length, area, angle) on the development, distribution and wave process of wind speed are analyzed, and the mechanism of these factors are revealed from the point of wave superposition. The results show that it is essential to take the compressibility of the gas into consideration on the simulation of wind speed in the traffic cave of surge tank of underground hydropower station in transient process. The wind speed fluctuation is superimposed by the low frequency mass wave (fundamental wave) and the high frequency elastic wave (harmonic wave). The length of traffic cave mainly effect amplitude and cycle of harmonic wave, the sectional area of traffic cave affect the amplitudes of fundamental wave and harmonic wave while the dip angle only influences the amplitude of harmonic wave.

**Key words:** underground hydropower station; traffic cave of surge tank; transient process; wind speed; gas compressibility; wave superposition; numerical simulation

(责任编辑: 韩 昆)



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: [http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

---