

分类号:\_\_\_\_\_

密 级:\_\_\_\_\_

UDC: \_\_\_\_\_

单位代

码: 10078

# 华北水利水电大学硕士学位论文

基于 MATLAB 的长隧洞有压引水式电站过渡过程研究

THE RESEARCH OF TRANSIENT PROCESS  
OF LONG TUNNEL PRESSURE DIVERSION  
TYPE POWER STATION BASE ON MATLAB

研 究 生 姓 名: 王洋

指 导 教 师: 王玲花 教授

专 业 名 称: 水利水电工程

所 在 学 院: 电力学院

2015 年 5 月



# 独立完成与诚信声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的科研成果并撰写完成的。没有剽窃、抄袭等违反学术道德、学术规范的侵权行为。文中除已经标注引用的内容外，本学位论文中不包含其他人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北水利水电大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示了谢意。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

保证人（导师）签名：

签字日期：

签字日期：

# 学位论文版权使用授权书

本人完全了解华北水利水电大学有关保管、使用学位论文的规定。特授权华北水利水电大学可以将学位论文的全部或部分公开和编入有关数据库提供检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段复制、保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文原件或复印件和电子文档。（涉密的学位论文在解密后应遵守此规定）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：



## 基于 MATLAB 的长隧洞有压引水式电站过渡过程研究

### 摘 要

水轮机过渡过程主要由机组负荷变化引起,伴随着水击压力波和调压室涌波的相互作用及水轮机组的转速变化,影响着水电站生产的安全和调节品质。根据负荷变化的大小,过渡过程又分为大波动和小波动过渡过程。水电站的大波动过渡过程直接影响电站运行,威胁电站安全;而小波动的稳定性又和电能质量密切相关。过渡过程计算的意义不仅仅在于缓和转速变化与压力变化这一矛盾,还须全面地分析和计算电站大小波动过渡过程的动态特性及稳定性,对电站整个输水系统的合理性和安全强度作出评估,为电站的设计、优化或运行提供参考依据。

本文绪论部分概要总结了国内外水电站过渡过程问题的研究成果和发展现状,简述了目前过渡过程计算存在的问题。正文部分介绍了水击计算原理,详细论述了长隧洞有压引水式电站过渡过程计算方法及优化手段。并在考虑调压室涌波和水击波互相作用的前提下利用 MATLAB 语言编程,针对某工程实例中大、小波动过渡过程进行计算。对于大波动,本文给出了多种工况下的调保参数及相应的过渡过程历程线、调压室涌波曲线。对于小波动,本文采用特征线法和状态方程分析的联合算法进行小波动过渡过程计算,优化了调速器参数。

此外,本文还对电站提出了若干优化建议,并利用多种控制工况对每项优化措施进行优化前后的数据对比。最后,本文利用同一种工况对电站优化进行了验证计算,证明了优化措施的可行性。

**关键词:** 引水式电站; 混流式水轮机; 水力过渡过程; 外特性法; 调保计算; MATLAB



# **THE RESEARCH OF TRANSIENT PROCESS OF LONG TUNNEL PRESSURE DIVERSION TYPE POWER STATION BASE ON MALAB**

## **ABSTRACT**

Hydro-turbine transition process is mainly caused by load changes, with the speed variations of units and interactions between water hammer pressure changing and surge waving, the safety of hydropower station and the quality of electricity are usually under affecting. According to the size of the load changing, transition process is divided into great fluctuations and small perturbation. Great fluctuation transient process directly affect the operation and threat to hydropower station, the stability of small perturbation and power quality are closely related. The function of calculation of transition process is not only alleviating the contradiction between rising of rotating speed and rising of water hammer pressure, but also rigorously analyzing and calculating the dynamic characteristics and stability of transition process and making an assessment of rationality and safety strength of water conveyance system, to provide the reference for the design, optimization, or units running of Hydro-power station.

The part of introduction of this dissertation simply introduced the practical value of the transition process research and the development situation both interiorly and abroad, summarized the current situation and listed the legacy. The body part of this dissertation introduced the theory of calculation of water hammer, discoursed the optimal means and calculation method of long tunnel pressure diversion type power station in details. Meanwhile, this dissertation used the MATLAB language for programming under the promise of considering the interaction between surge wave and water hammer, made the calculation for the great fluctuations and small perturbation of specific engineering. For great fluctuations, this dissertation ascertaining the specific parameters of regulation guarantee and corresponding transition curves, provided the curve charts of water levels in surge tank. For small perturbation, this dissertation united both state equation analysis method and method of characteristics for small perturbation, optimized the governor setting parameters.

Besides, this dissertation gave some optimal advices to power station and made a data comparison between before and after optimization in many kinds of control working conditions. Finally, this dissertation demonstrated the feasibility of optimization measures in

the same one working condition.

**KEY WORDS:** Diversion type hydro-station ; francis turbine; hydraulic transient process; the external characteristic method; calculation of regulation guarantee; MATLAB



## 符号说明

- $a$ : 水击波速, m/s  
 $A$ : 管道断面积,  $\text{m}^2$   
 $b_p$ : 调速器永态转差系数  
 $b_i$ : 调速器暂态转差系数  
 $B$ : 输入矩阵  
 $GD^2$ : 机组转动部分飞轮力矩,  $\text{kN}\cdot\text{m}^2$   
 $f$ : 管道沿程损失系数(达西-威斯巴哈摩擦系数)  
 $g$ : 重力加速度, N/kg  
 $H_s$ : 调压室内水位, m  
 $h'_w$  为管路特性常数  
 $J$ : 机组转动部分的转动惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$   
 $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ : 调速器比例、积分、微分增益  
 $L$ : 管道长度, m  
 $M_t$ : 水轮机主动力矩,  $\text{kN}\cdot\text{m}$   
 $M_g$ : 发电机电磁转矩, 即机组阻力矩,  $\text{kN}\cdot\text{m}$   
 $m$ : 力矩相对值  
 $M'_1$ : 单位力矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$   
 $n$ : 机组转速, r/min  
 $n'_1$ : 机组单位转速, r/min  
 $Q$ : 管道流量,  $\text{m}^3/\text{s}$   
 $Q'_1$ : 单位流量,  $\text{m}^3/\text{s}$   
 $R_s$ : 调压室的阻抗损失系数  
 $s_L$ 、 $y_L$ : 主配压阀限幅值、主接力器限幅值  
 $t$ : 时间, s  
 $\Delta t$ : 时间步长, s  
 $T_y$ : 接力器时间常数, s  
 $T_a$ : 机组惯性时间常数, 又称机组加速时间常数, s  
 $T_d$ : 缓冲时间常数, s  
 $T_n$ : 升速时间, s  
 $T_s$ : 导叶有效关闭时间, s

$T_w$ : 水流惯性时间常数, s

$U$ : 调节系统输入列向量

$V$ : 管道流速, m/s

$x$ : 从任意起点开始的沿管轴坐标距离, m

$\Delta x$ : 空间步长, m

$X$ : 状态向量

$y$ : 导叶接力器行程相对值

$\dot{y}_{c\max}$ : 导叶关闭的最大速度相对值, 为负数

$\dot{y}_{o\max}$ : 导叶开启的最大速度相对值

$\alpha$ : 导叶开度, mm

$\beta$ : 机组转速相对升高值

$\gamma$ : 水的容重, N/m<sup>3</sup>

$\omega$ : 机组转动角速度, rad/s

$\xi$ : 相对压力升高值

$\zeta$ : 局部损失系数

# 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	III
符号说明 .....	V
1 绪论 .....	1
1.1 本课题研究的背景和意义 .....	1
1.2 水力过渡过程国内外研究历史 .....	1
1.3 过渡过程研究的现状及问题 .....	2
1.4 本文研究的主要内容 .....	4
2 水击计算的方法及原理 .....	5
2.1 水击现象简介 .....	5
2.2 计算水击的特征线法 .....	6
2.2.1 运动方程 .....	6
2.2.2 连续方程 .....	7
2.2.3 特征线法原理 .....	9
2.3 边界条件和时间步长的确定 .....	13
2.3.1 边界条件 .....	13
2.3.2 时间步长 .....	17
2.4 蜗壳和尾水管的当量化 .....	18
2.4.1 蜗壳的当量化 .....	19
2.4.2 尾水管的当量化 .....	19
3 长隧洞有压引水式电站过渡过程分析与 MATLAB .....	21
3.1 过渡过程主要研究对象 .....	21
3.1.1 调压室 .....	21
3.1.2 水轮发电机组 .....	23
3.2 过渡过程研究的主要任务 .....	24
3.3 大波动过渡过程 .....	25
3.3.1 压力及转速变化计算 .....	25
3.3.2 调压室最高涌浪水位的计算 .....	26
3.3.3 调压室最低浪涌水位的计算 .....	26

3.3.4 改善大波动过渡过程的主要手段 .....	27
3.4 小波动过渡过程 .....	28
3.4.1 小波动过渡过程计算 .....	28
3.4.2 Thoma 公式 .....	28
3.4.3 影响 Thoma 断面的参数分析 .....	29
3.5 基于 MATLAB 的特征线法电算 .....	31
3.5.1 本文选用 MATLAB 的原因 .....	31
3.5.2 过渡过程的电算方法 .....	31
4 工程实例分析 .....	34
4.1 电站原始资料 .....	34
4.2.1 流量特性和力矩特性的获取 .....	36
4.2.2 管道的分段及当量化 .....	42
4.3 工况的拟定及计算标准 .....	43
4.3.1 工况的拟定及命名 .....	43
4.3.2 计算标准 .....	44
4.3 最优导叶关闭规律的确定 .....	45
4.4 计算结果与分析 .....	48
4.4.1 调压室极限涌浪水位工况的计算 .....	48
4.4.2 极限转速、极限压力确定工况的计算 .....	50
4.4.3 关于小波动过渡过程调节品质的计算 .....	54
4.5 关于 X 电站的若干条优化建议 .....	56
4.5.1 水轮机选型设计的优化 .....	57
4.5.2 机组飞轮力矩的优化 .....	57
4.5.3 调压室的优化 .....	57
4.5.4 对于电站优化的同种工况验证计算 .....	58
5 研究成果与展望 .....	63
攻读学位期间参加的科研项目及发表的学术论文 .....	69
致 谢 .....	69
参考文献 .....	69

## 1 绪论

### 1.1 本课题研究的背景和意义

纵观我国常规能源组成,水能是仅次于煤炭的第二大能源,且其可开发量位居世界第一<sup>[1]</sup>。为此,近些年来我国竣工了一批规模较大的水电站。水电站过渡过程问题的研究往往联系着水电站设计和运行中的一些经济性问题。它不仅对水电站的整体布局和造价有着重要影响,其动态品质还与电站生产电能的质量密切相关。与此同时,过渡过程问题的研究还涉及水电站的重要安全问题。在水电站甩负荷时,由于水轮机导叶关闭时间太短或关闭规律不良,导致引水室和压力管道等过水系统中的压力随之急剧升高,或由于导水机构关闭时间太长,机组转速上升过高甚至飞逸,都是造成水电站事故的原因之一。1956 年苏联卡霍夫水电站由于甩负荷后控制不良,发生反水锤,导致机组上抬,转轮、导叶、顶盖被击毁,厂房被淹。再如 1994 年中国天生桥二级水电站,由于甩负荷控制规律不良,导致水锤叠加,差动式调压井升管遭到破坏<sup>[2]</sup>。实际上为了满足水电站的生产需要,机组在大、小波动情况下的过渡过程频繁发生。但凡是水轮机的工作状态发生变化,如机组启动、停机、增减负荷、事故甩负荷、飞逸、退出飞逸、紧急停机、发电与调相之间相互转换等,甚至水轮机水头的轻微变化,都能引发过渡过程。据统计,过渡过程工况平均每小时可达 0.22~0.25 次。故而如何有效确保过渡过程的安全和生产电能的品质,显得日益重要。

### 1.2 水力过渡过程国内外研究历史

国外研究历史较为悠久。Menabrea 作为最早提出弹性水击的学者,早在 1858 年便发表了有关水击的笔记<sup>[3]</sup>,他根据能量分析法,同时考虑了管壁的弹性和流体的可压缩性,阐述了水击的基本理论,成为了弹性水击研究的奠基人。1897 年俄国的空气动力学学者 Joukowsky 发表了关于水力过渡过程基本理论的经典报告<sup>[3]</sup>;1904 年,首次提出了直接水击压强计算公式 ( $\Delta H = av/g$ )<sup>[3]</sup>。同年,德国汉堡水电站首次发生调压井质量波动现象,Thoma 随后提出了计算调压井临界稳定断面的 Thoma 公式<sup>[3]</sup>。1913 年,Allieve 首先提出了水击计算连锁方程、水击图解曲线,以及末相水击计算式,开创了水击分析的解析法,但这种方法适用条件苛刻且精度很难保障。1926 年,Storwger 和 Kerr 认为水击压力会影响水轮机转速改变,并创立了由负荷瞬间改变引起的机组暂态转速改变的计算理论,继而调节保证计算被提出,并增加到水电站的设计任务当中。三十年代,计算水击问题的图解法逐渐被应用,它的原则是在不考虑管道摩阻的情况下,将水击基本的方程式变换为对管道内两点的两个共轭方程,然后在 H-V 图上绘制特征线,按图计算。图解法较解析法而言有所突破,但十分依赖作图技巧,且在复杂条件下精度十分有限,并且计算的过程也十分繁琐。1945 年,科登提出的《机组调节保证计算问题的分析》一

文,从水轮机调速器参数整定、调节保证计算分析等方面对调保计算进行了更加详细的研究和探讨。二十世纪中叶,由克里夫琴科主编的《水电站动力装置中的过渡过程》<sup>[4]</sup>发表,对水力机组过渡过程的研究产生了深远的影响。

随着电子计算机的诞生,V.L.Streeter 和 E.B.Wylie 开创性地把水力瞬变的数值引用至特征线法中,利用电子计算机对复杂水力瞬变系统进行了研究和分析。E.B.Wylie 教授还在气液两相流方面有所突破,提出了当管路中气体体积远小于液体体积时的自由气体—离散模型。1967 年,他们所著的《瞬变流》出版,该书不仅详细介绍了流体过渡过程的普遍分析方法,而且针对不同流体和系统的特性进行了更为细致的研究。与此同时,Qulet 为了优化调压室断面面积,将霍尔维茨判据运用到了调压室的波动稳定性判别上面,并线性化了描述调压室水位波动的非线性微分方程,最后将调压室水位波动的稳定区域以无因次参数的形式绘制了出来<sup>[5]</sup>。七十年代,Seth 提出了关于水击波越过调压室底部传至有压引水隧洞的研究报告<sup>[6]</sup>,指出了阻抗式调压室的优越性,在相同情况下,较简单圆筒式调压室而言,阻抗调压室只需是其体积的 30%~40%。20 世纪 80 年代中期,Lattice-Boltzmann 方法开始崭露头角,它的并行性以及处理复杂边界条件的能力都优于传统算法,而且能不作计算网格的情况下直接模拟有复杂几何边界的诸如多孔介质等连通域流场。

自改革开放以来,国内水力过渡过程的研究进展颇丰。二十世纪八十年代初,董兴林发表了《水电站调压室稳定断面问题的研究》,他根据罗斯—霍尔维茨稳定判据推出了调速器影响下调压室稳定断面计算公式,并指出了使水电站在其调压室断面小于托马断面的条件下稳定运行的可能性<sup>[7]</sup>,但由于他推得的调压室稳定断面计算公式未能完全满足判据条件。九十年代初董兴林通过对大朝山水电站尾水调压断面的实际研究,分析得出了调节系统的稳定域,并采用增大调速器参数的方法,减小了调压室稳定断面。董兴林和杨开林对水电站水力瞬变过程中调压室漏空时的气液两相流进行了实验和研究,并验证了离散模型可以用来模拟气液两相流的理论<sup>[8]</sup>,之后叶宏开等人又对 Wylie 提出的自由气体—离散模型做出了一些修改。马吉明等人对调压室受到简谐振动时的水压分布情况进行了研究,得出了水击压力系数的理论计算公式。杨建东等人分析了 T 型岔管处动量交换项和速度水头对尾水调压室的影响。索丽生提出利用系统微小波动性微分方程组来分析系统波动过程和动态品质<sup>[9]</sup>,陈祥荣经过研究表明,增大隧洞阻力系数在有助于调压室波动衰减的同时容易造成电能损失,在调压室底部增加阻抗或许会是更好的选择<sup>[10]</sup>。程永光、张师华等人通过模拟水电站水击的一维 Lattice-Boltzmann 模型,成功地验证了 Lattice-Boltzmann 方法针对一维问题的有效性<sup>[11]</sup>。

### 1.3 过渡过程研究的现状及问题

目前水击研究方面存在的问题还有很多,例如水击数学模型还存在一定问题,目前所应用的水击方程中的连续性方程不能在普遍情况下满足恒定流<sup>[12]</sup>,文献[13]对水击基

本方程作出了改进，并对新老水击方程作出对比，但该问题的原因、影响、以及解决办法都有待研究。

在调压室方面，电站常常通过设置调压室的方法控制压力管道和引水室的最大压力以及尾水管真空度，提高电站运行稳定性，保证供电质量。在确定设置调压室的时候，往往希望在保证围岩稳定的前提下，使调压室尽可能地靠近厂房，以保证过渡过程的品质。

合理的调压室稳定断面不仅能确保水位波动的快速衰减，而且还与系统稳定和调节品质密切相关。调压室稳定断面选取的主要依据是托马公式，为

$$A = \frac{LA_1}{2g(a+1/2g)(H_0-h_{u0}-3h_{um})}$$

式中：A 为托马临界稳定断面面积；

L 为压力引水道长度；

$A_1$  压力引水道断面面积；

$g$  为重力加速度；

$H_0$  为发电最小净水头；

$h_{u0}$  为压力引水道水头损失；

$h_{um}$  为压力管道水头损失。

传统的调压室稳定断面的选定是先确定托马断面面积，然后乘以安全系数。以往的策略偏于保守，常常选择较大的安全系数值，欧洲的实际工程中可以达到 1.8。而托马公式的假定条件是：

1. 波动为线性，扰动无限小；
2. 水电站孤立运行；
3. 调速器绝对灵敏，严格保证出力；
4. 忽略水轮机效率变化产生的影响。

但随着水电站并网运行和电力系统容量的扩大，单个水电站的比重日趋减小，某一电站单独供给某一地区的情况也逐渐减少，负荷波动对供电质量的影响日趋减小。与此同时，自董兴林通过增大调速器软反馈强度和软反馈时间常数来减小调压室稳定断面以来，合理的调速器参数整定与托马断面之间的关系被国内学者深入探讨，并取得一些卓有成效的见解。如今水电站往往偏向较小的安全系数值，对于一些容量小、水头低的电站，通过减小安全系数值节省投资效果尤为明显，例如海甸峡水电站甚至达到了托马断面的 40%<sup>[14]</sup>。托马公式对单个调压井的简单引水系统来说十分有效，但由于上下游双调压井的引水系统小扰动方程非常复杂，很难得到稳定断面的解析公式。虽然目前针对此类情况已经有近似的判别公式，其小波动稳定性也得到了一定程度的解决，然而目前出现的不对称布置的双调压井引水系统的调压室稳定面积计算问题在理论层面仍未健全。文献[15]通过推导得出引水系统小扰动特征方程，并给出了近似判别公式，利用工程实

例对其提出的方法和托马准则进行对比，证明了其优越性。

近些年来，集成 PLC（可编程逻辑控制）和 IPC（工业个人计算机）优势的 PCC（可编程计算机控制）型调速器已经投入使用，国内水轮机调速器的核心控制器已经发展到 32 位双微机控制器<sup>[16]</sup>。调节系统控制策略趋于成熟，从定参数的 PI、PID 到目前的变参数 PID，自适应控制、模糊控制，以及神经网络控制等新型调节规律正在发展<sup>[17]~[19]</sup>。目前单一的控制规律已逐渐无法满足控制需要，将多种控制策略整合到一起发挥各自优点的复合控制规律成为今后水轮机调节控制策略的发展趋势<sup>[20]</sup>。

改善大波动的大部分调节保证措施只适用于水电站设计阶段，而水电站建成之后的改善手段主要通过优化导叶关闭规律来实现。目前运用普遍的导叶关闭规律，如直线关闭、分两段或三段折线关闭，改善机组的程度是有限的，故而非线性导叶关闭规律的研究成为热点。如今非线性导叶关闭规律的优化方法大多是将目标线性加权，通过构造评价函数来进行求解，文献[21]建立了不需要经过试算或经验确定权系数的新的非线性评价函数，更贴近实际地着眼于保证所有工况优化需求的目标，采用遗传算法进行多工况优化。文献[22]提出了非固定模式的导叶关闭规律的概念，主张根据水轮机不同工况实时采用不同形式的导叶关闭规律。文献[23]中利用实例证明了非固定模式关闭导叶的优越性，在一定程度上改善了固定形式导叶关闭规律无法在关闭时间内每一时刻达到最优的缺点。而对于导叶的开启时间，国际电工委员会的标准是 20-80s，推荐值是 30-40s<sup>[24]</sup>，但水轮机电液调节系统及装置技术规程中规定一般为 10-40s<sup>[25]</sup>，大体上看两者范围仍有出入。文献[26]和[27]分别讨论了在特定情况下导叶开启和关闭的时间及规律对水电站过渡过程的影响。

## 1.4 本文研究的主要内容

水电站过渡过程是水电站转换不同的运行工况时的瞬变过程，大致可分为大波动和小波动过渡过程。对于小波动，主要通过给定合理的调速器整定参数、调压室稳定断面等手段解决其系统稳定性等问题。目前小波动稳定计算和分析的办法主要有两种，分别是基于特征线法考虑水体弹性的方法和基于状态方程的刚性水击法。两种方法在各有侧重的前提下可以互相验证，故本文采用结合两种方法的联合算法。对于大波动，一般通过计算各种工况下输水系统沿线的压力最大值和最小值、测压管水头包络线、调压室最高和最低水位、尾水管进口最大真空度、蜗壳末端最大压力上升率、机组转速最大上升率，以及相应的过渡过程曲线来进行水力机械系统整体布置的合理性和强度评估。改善手段主要有增加机组 GD<sup>2</sup>、设置调压室、装设调压阀、确定导叶关闭规律等。

本文着眼于特征线法，挑选过渡过程计算中最为典型和复杂的长隧洞有压引水式电站进行分析，在考虑了调压室涌波和水击波互相作用的前提下，通过 MATLAB 语言编程对实际电站进行过渡过程计算，进而对其水力系统合理性、安全性进行评估，通过调压室优化、调速器参数优化、导叶关闭规律优化等手段进行优化，使电站运行更加合理。



## 2 水击计算的方法及原理

众所周知，水电站过渡过程研究的核心是水击现象，又称水锤、有压非恒定流、有压瞬变流。水击通常由水电站增加负荷时过水系统的流量或流速变化引起，其压力波变化急剧，传播迅速，危机电站安全，影响电能品质。所以水击现象通常需要通过复杂的计算，然后严格按照计算选择具体措施进行控制。

虽然目前二维、三维的水击计算方法正在不断发展，但时至今日，在水击计算方面应用最广泛也最可靠的方法仍旧是将水流作为一元流处理，其中最为成熟和普遍的是特征线法。在考虑管路摩阻的情况下将两大基本方程（运动方程和连续方程）转化为在特征方程上的常微分方程组，即特征线方程，对常微分方程组沿其特征线进行积分，产生近似的代数积分式，即有限差分方程，根据有限差分方程和边界条件方程进行计算。特征线法可以很好地处理复杂的边界条件，精度高，收敛性好，但它要求所有管道系统必须采用相同的时间步长，并且为了满足 Courant 稳定条件，其采用的时间步长必须足够小。所以还需引入内插法、刚化短管法帮助计算，同时对计算机容量和运算速度有一定要求。

另一种较为常见的一元流方法称为隐式差分法。它和特征线法一样，联立流体力学方程式进行数值计算，在考虑管道摩阻的情况下将水击偏微分方程式直接由有限差分方程表示。这种方法不用过多地考虑时间步长，对计算机计算容量和速度的要求不高，但它在边界条件较为复杂的情况下迭代过程较为复杂，容易在流体瞬态变化比较剧烈的情况下产生较大的计算误差。文献[28]在不同的过渡过程下对特征线法和隐式差分法进行了对比。由于本文研究的边界条件较为复杂，故采用特征线法。

### 2.1 水击现象简介

水击现象是指当压力水管末端的流量发生急剧变化时，水管内将出现的非恒定流现象<sup>[2]</sup>，且随着流速的改变有较显著的变化。

在一个恒定流的输水系统中，当管路末端流量调节机构突然全部关闭（即流体速度为 0）的瞬间，上游水体依然保持恒定流速度向流量调节机构靠近。于是阀门附近的水体密度增大，管径因受到应力而变粗，压力增加。此时，由于阀门处水头要高于上游，不能达到力学平衡，因此水体又被挤向上游，而流量调节机构处的水体又逐渐恢复正常。这种来回传递，类似声波的波动被称为水击波，其传播速度被称为水击波波速。

设管道长为  $L$ ，水击波速为  $a$ ，则水击往返管道时间为  $2L/a$ ，假设流量调节机构的关闭时间为  $T_s$ ，若  $T_s \leq 2L/a$ ，这种水击被称为直接水击。由于直接水击正面接受上游传播的正向波，所以直接水击对管道末端造成的水击压力非常大，常常是水电站保障安全运行时所不能接受的，故而应当避免直接水击的发生。

若  $T_s \geq 2L/a$ ，管道末端受到的水击波冲击力相对较小，相对安全，这种水击被称为间接水击。本文主要研究的长隧洞有压引水式电站常设有调压室，一般属于间接水击，所以本文研究的主要对象为间接水击。

## 2.2 计算水击的特征线法

水电站有压输水管道水击过程相当复杂，而当目前研究水击的方法也都存在一定的局限性：含气水击的理论还不完善<sup>[29]</sup>，其研究成果难以广泛而有效地应用于实践<sup>[30]</sup>，例如具体如何利用掺气的手段降低水击弹性波速，从而达到在压力输水系统中减小水击压力的目的。流速水头与波形改变对水击的影响还需更为详尽的解释与分析，水击共振的原因与特性的分析、有压管道中的水柱分离的水击在理论层面仍未健全。

而特征线法所依赖的水力学方程也有其局限性。首先，特征线法默认水流为一元流，流速在管道内均匀分布，且假设不存在含气水击及柱液分离现象。其次在考虑弹性水击时水体和管壁所承受的应力应与其形变成线性比例关系，在采用计算恒定流的阻力损失方法计算非恒定流的同时默认同一管道特性单一。

### 2.2.1 运动方程

运动方程是特征线法的基本方程之一，其原理为著名的牛顿第二定律，即： $\sum F = ma$ 。由于将流体考虑为一元流，故只分析流体流动方向上的力。 $\sum F$  为流体流动方向上受到的合力， $m$  为流体质量， $a$  为流体加速度。运动方程无法从整体入手描述整个输水系统流体运动，故在沿有压输水管道水体中选取隔离体如图 2-1 所示。

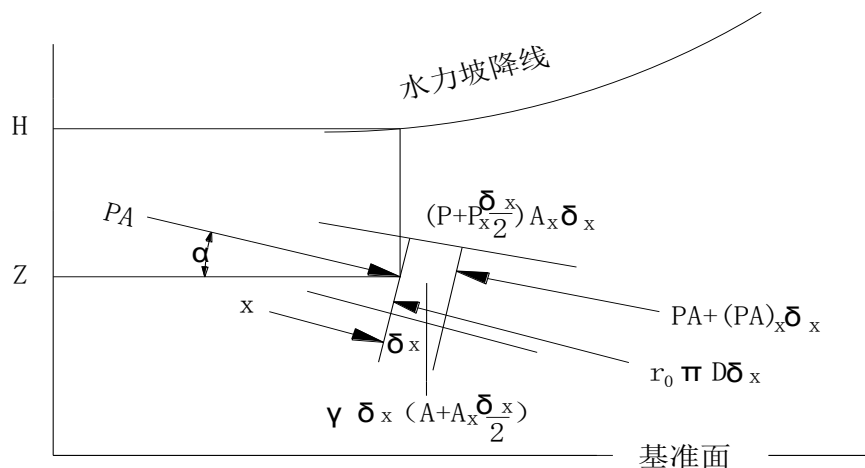


图 2-1 控制体示意图

Fig 2-1 Schematic diagram of control volume

隔离体截面为管道截面，厚度为  $\delta_x$ ，在轴向合力的作用下，沿  $x$  轴向运动。通过分析，不难将合力  $\sum F$  分解为便于数学描述的几个分力。易知，上下游侧横截面上的压力

分别为  $PA$  和  $PA + (PA)_x \delta_x$ ，而  $(P + P_x \frac{\delta_x}{2})A_x \delta_x$  为由于管道截面增加而产生的管壁对水体的轴向压力，易知  $(A + \frac{A_x}{2})\delta_x$  为水体平均截面，故  $(A + \frac{A_x}{2})\delta_x \gamma \sin \alpha$  为轴向水体重力分力。设  $\tau_0$  为管壁摩阻应力，则水体受到管壁的阻力为  $\pi D \delta_x \tau_0$ ，水体质量  $m = (A + \frac{A_x}{2})\delta_x \rho$ ，加速度  $a = \frac{dV}{dt}$ 。

隔离体满足牛顿第二定律，方程为：

$$PA - [PA + (PA)_x \delta_x] + (P + P_x \frac{\delta_x}{2})A_x \delta_x + (A + \frac{A_x}{2})\delta_x \gamma \sin \alpha - \pi D \delta_x \tau_0 = \delta_x \rho \dot{V} (A + \frac{A_x}{2})$$

其中， $\dot{V}$  为  $\frac{dV}{dt}$ ，为方便表示，物理量上的“ $\square$ ”代表对时间的全导数，下同。

忽略高阶微量，有：

$$A \frac{\partial p}{\partial x} + \tau_0 \pi D - \rho g A \sin \theta + \rho A \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2-1)$$

忽略  $\tau_0$  在定常流与瞬变流时的差异，并根据根据 Dracy-Weisbach 公式，有：

$$\tau_0 = \frac{\rho f |V| V}{8} \quad (2-2)$$

式(2-1)中加速度适用于控制体质点，则

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2-3)$$

易知

$$\frac{p}{\gamma} = H - Z \quad (2-4)$$

故

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial Z}{\partial x} \right) = \rho g \left( \frac{\partial H}{\partial x} + \sin \theta \right) \quad (2-5)$$

由于  $\rho$  为常数，将式(2-2)、(2-5)、(2-1)联立，并变换为微分形式，得：

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f |V| V}{2gD} = 0 \quad (2-6)$$

上式即为研究水击的特征线法基本方程之一：运动方程。

### 2.2.2 连续方程

根据分析水击过程是否考虑水体和管道的可压缩性，水击计算可以分为弹性水击和刚性水击。刚性水击不考虑水体和管道的可压缩性，即管路内的流量与坐标  $x$  无关，仅是时间  $t$  的函数<sup>[31]</sup>。显然，弹性水击较刚性水击而言更能精确地描述实际水击过程，故本文选择弹性水击方法进行考虑。连续方程的核心思想是质量守恒定律，即在不考虑管

道和水体的可压缩性的情况下，单位时间内流入与流出控制体的水体质量相等。但加入弹性因素之后，单位时间内流入与流出控制体的水体应存在差值，其差值为水体质量增长率。

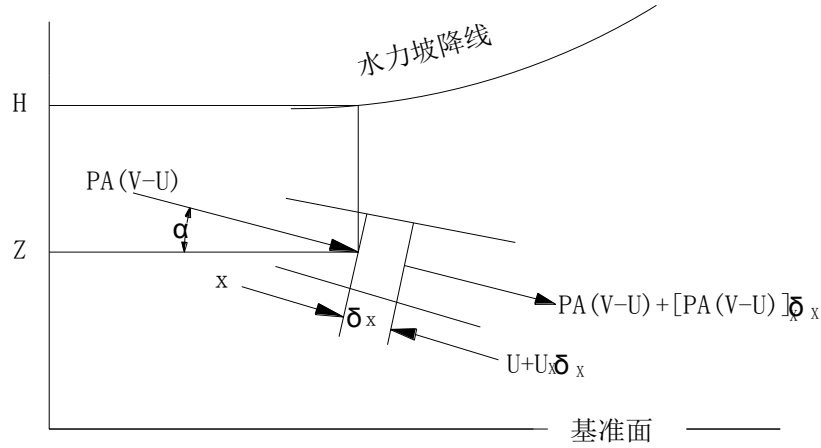


图2-2连续方程物理量示意图

Fig 2-2 Schematic diagram of physical quantity of continuity equation

根据图 2-2 所示物理量，控制体单位时间内水体流入与流出差值为：

$$\rho A(V-U) - \{\rho A(V-U) + [\rho A(V-U)]_x \delta_x\}$$

水体质量变化率为：

$$\frac{d}{dt}(\rho A \delta_x)$$

则连续方程可表示为：

$$\rho A(V-U) - \{\rho A(V-U) + [\rho A(V-U)]_x \delta_x\} = \frac{d}{dt}(\rho A \delta_x)$$

根据  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x}$  及  $U_x = \frac{1}{\delta_x} \frac{d}{dt} \delta_x$ ，消去  $U$ ，得

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A V)}{\partial x} = 0 \quad (2-7)$$

根据密度  $\rho$  和管道截面积  $A$  的全导数  $\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + V \frac{\partial\rho}{\partial x}$  及  $\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + V \frac{\partial A}{\partial x}$ ，连续方程变为：

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} + \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2-8)$$

再根据弹性模量定义  $\frac{\dot{\rho}}{\rho} = \frac{\dot{p}}{K}$ ，有

$$\frac{\dot{p}}{\rho} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2-9)$$

其中波速  $a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + K \left[ \frac{\dot{A}}{A} / \left( \frac{\dot{p}}{A p} \right) \right]}}$ ，由于  $\frac{p}{\gamma} = H - Z$ ，故  $\partial Z / \partial t = 0$ ， $\partial Z / \partial x = -\sin \alpha$ ，

整理可得连续方程：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \alpha = 0 \quad (2-10)$$

### 2.2.3 特征线法原理

运动方程和连续方程是特征线法的基本方程，但着手计算之前，还需要将两个基本方程求解。然而，众所周知，作为拟线性双曲型偏微分方程组的运动方程和连续方程求解过程十分复杂，现在尚无合理方法直接求出理论上的准确解。特征线法计算水击时的指导思想是先将偏微分方程变换为常微分方程，求出的亦为近似解。首先，推导常微分方程，即特征线方程：

设  $L_1 = 0$ ， $L_2 = 0$ ，有

$$L_1 = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f|V|V}{2gD} = 0 \quad (2-11)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \alpha = 0 \quad (2-12)$$

再引入未知量  $\lambda$ ，进行线性组合，有

$$\begin{aligned} L_1 + \lambda L_2 &= \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f|V|V}{2gD} + \lambda \left( \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \alpha \right) \\ &= \lambda \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + \left( V + \frac{1}{\lambda} \right) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + \left( V + \lambda a^2 \right) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{f|V|V}{2gD} + \lambda V \sin \alpha = 0 \end{aligned} \quad (2-13)$$

限定  $\lambda$  值：

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{1}{\lambda} = V + \lambda a^2 \quad (2-14)$$

根据  $\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt}$ ， $\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt}$ ，有

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f|V|V}{2gD} + \lambda V \sin \alpha = 0 \quad (2-15)$$

根据 (2-14)，解得未知量  $\lambda = \pm \frac{1}{a}$ ，带入上式，可得特征线方程组：

$$C^+ : \begin{cases} \frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f|V|V}{2gD} + \frac{1}{a} V \sin \alpha = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{cases} \quad (2-16)$$

$$C^-: \begin{cases} -\frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f|V|V}{2gD} - \frac{1}{a} V \sin \alpha = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{cases} \quad (2-17)$$

波速  $a$  一般在  $1000\text{m/s}$  左右，而管道流体速度  $V$  通常达不到这个量级。由于  $a \gg |V|$ ，因此在特征线方程计算中可略去  $V$ 。同理，方程中  $V \sin \alpha / a \approx 0$ ，故此项也可略去。

将(2-16)和(2-17)化简，得：

$$C^+: \begin{cases} \frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f|V|V}{2gD} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases} \quad (2-18)$$

$$C^-: \begin{cases} -\frac{1}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f|V|V}{2gD} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \quad (2-19)$$

这即是所谓的特征线方程。从特征线方程组中可以看出， $x$  对  $t$  的导数为  $a$  或  $-a$ ，分别满足  $C^+$  和  $C^-$  的相容性方程。 $a$  为波速，通常情况下为常数，故其在  $x-t$  坐标系表示斜率时通常为直线。如图2-3示，沿特征线  $PA$ ，方程  $C^+$  方程成立；沿  $PB$ ，方程  $C^-$  成立。

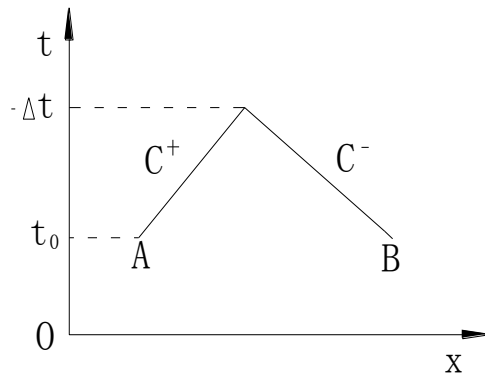


图2-3  $x-t$  平面上的特征线

Fig 2-3 Characteristic lines in  $x-t$  plane

进行水力计算时，通常给出的已知条件只有原始工况数据，即  $t_0$  时刻的水力参数，并希望通过计算预测  $t_0$  时刻以后水力系统各点参数的变化趋势或结果。特征线法的任务便是如此。从上述推导不难发现，根据  $A$ 、 $B$  两点的参数和特征线方程，可以求出  $P$  点在  $t_0 + \Delta t$  时刻的水力参数，如图2-3所示。把一根长为  $L$  的管道分成  $N$  等份，每段长度为  $\Delta x = L/N$ ，每相邻两点都有其对应的下一时刻的“ $P$ 点”，逐个计算，就通过计算完成了整个管道对  $t_0 + \Delta t$  时刻的预测。将  $\Delta t$  称为时间步长，与管道分段一起，构成特征线计算

网格，并取  $\Delta t = \Delta x/a$ （如图2-4所示），以  $\Delta t$  为单位逐步进行计算，就可以完成规定时间内对整个水力系统的水力计算。

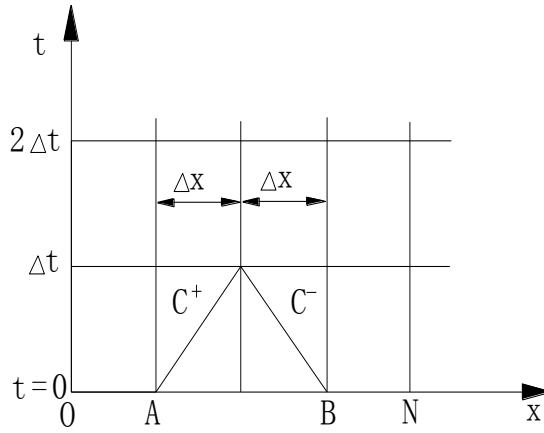


图 2-4  $x-t$  特征线网格

Fig 2-4 Characteristic grid of  $x-t$  plane

将偏微分方程转换为易于求解的常微分方程后，仍需根据特征线方程进行积分，最后得出近似的代数式，以便于水力计算。

以  $a dt = dx$  乘式  $C^+$  方程组中的相容性方程，设管道流量为  $Q$ ，截面积和流速分别为  $A$  和  $V$ ，有  $Q = AV$ ，以  $A$  点为例，沿  $C^+$  特征线积分得：

$$\int_A^P dH + \frac{a}{gA} \int_A^P dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_A^P |Q|Q dx = 0$$

即

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f}{2gDA^2} \int_A^P |Q|Q dx = 0 \quad (2-20)$$

由于  $x_{i-1}$  可导，有

$$\begin{aligned} \int_A^P |Q|Q dx &= \int_A^P \left[ |Q_A|Q_A + 2|Q_A| \left( \frac{dQ}{dx} \right)_A (x - x_{i-1}) + O(x - x_{i-1})^2 \right] dx \\ &= |Q_A|Q_A \Delta x + |Q_A| \left( \frac{dQ}{dx} \right)_A \Delta x^2 + O(\Delta x^3) \end{aligned}$$

根据Streeter的建议，忽略  $\Delta x$  二阶以上微量，则可以将上式转换为

$$\int_A^P |Q|Q dx = |Q_A|Q_A \Delta x \quad (2-21)$$

将式(2-21)代入式(2-20)，整理得

$$C^+: Q_P = Q_A + \frac{gA}{a} (H_A - H_P) - \frac{f|Q_A|Q_A}{2DA} \Delta t \quad (2-22)$$

同理可得

$$C^-: Q_P = Q_B + \frac{gA}{a}(H_B - H_P) - \frac{f|Q_B|Q_B}{2DA}\Delta t \quad (2-23)$$

水力计算通常给定  $t_0$  时刻的定常流状态初始参数，因此管道每一个计算断面上的  $H_A$ 、 $Q_A$ 、 $H_B$ 、 $Q_B$  都是给定的。对于任何一个内部网格交点，通过联立  $C^+$  和  $C^-$  相容性方程，即可得出未知量  $H_{Pi}$  和  $Q_{Pi}$ 。

$$\text{设 } C_P = Q_A + C_a H_A - R Q_A |Q_A|, \quad C_n = Q_B - C_a H_B - R Q_B |Q_B|, \quad C_a = \frac{gA}{a}, \quad R = \frac{f\Delta t}{2DA},$$

方程(2-22)和(2-23)可以简化为：

$$C^+: Q_P = C_P - C_a H_P \quad (2-24)$$

$$C^-: Q_P = C_n + C_a H_P \quad (2-25)$$

易知， $C_P$ 、 $C_n$ 、 $C_a$  是  $t-\Delta t$  时刻已知量， $C_a$ 、 $R$  是关于管道特性的常数。

联立求解式(2-24)和式(2-25)得

$$Q_{Pi} = \frac{C_P + C_n}{2} \quad (2-26)$$

从而  $H_{Pi}$  可以直接算出。

将式(2-24)写成如下形式：

$$Q_P = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - \frac{f\Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| - \frac{gA}{a} H_P$$

取相对值

$$\frac{Q_P}{Q_r} = \frac{Q_A}{Q_r} + \frac{gAH_r}{aQ_r} \frac{H_A - H_0}{H_r} - \frac{fQ_r\Delta t}{2DA} \frac{Q_A}{Q_r} \left| \frac{Q_A}{Q_r} \right| - \frac{gAH_r}{aQ_r} \frac{H_P - H_0}{H_r} \quad (2-27)$$

$$\text{定义相对流量 } \bar{q}_P^t = \frac{Q_P}{Q_r}, \quad \bar{q}_A^{t-\Delta t} = \frac{Q_A}{Q_r}, \quad \text{相对压力升高 } \xi_P^t = \frac{H_P - H_0}{H_r}, \quad \xi_A^{t-\Delta t} = \frac{H_A - H_0}{H_r},$$

$$\text{管路特性常数 } h_w' = \frac{aQ_r}{2gAH_r}, \quad \text{基值流量时水头损失相对值 } k' = \frac{fQ_r^2\Delta x}{2gDA^2H_r}, \quad \text{设 } h_w = 2h_w',$$

$$k = \frac{k'}{h_w}, \quad \text{代入上式，得}$$

$$\bar{q}_P^t = \bar{q}_A^{t-\Delta t} + \frac{\xi_A^{t-\Delta t}}{h_w} - k\bar{q}_A^{t-\Delta t} \left| \bar{q}_A^{t-\Delta t} \right| - \frac{\xi_P^t}{h_w}$$

其中，为表明  $q^2$  值的方向性，加入绝对值号。

$$\text{设 } C_P' = \bar{q}_A^{t-\Delta t} + \frac{\xi_A^{t-\Delta t}}{h_w} - k\bar{q}_A^{t-\Delta t} \left| \bar{q}_A^{t-\Delta t} \right|, \quad C_n' = \bar{q}_B^{t-\Delta t} - \frac{\xi_B^{t-\Delta t}}{h_w} - k\bar{q}_B^{t-\Delta t} \left| \bar{q}_B^{t-\Delta t} \right|, \quad C_a' = \frac{1}{h_w}, \quad \text{化简得}$$

$$\bar{q}_P^t = C_P' - C_a' \xi_P^t \quad (2-28)$$

同理

$$\bar{q}_P^t = C_n' + C_a' \xi_P^t \quad (2-29)$$



## 2.3 边界条件和时间步长的确定

### 2.3.1 边界条件

上文理论说明,通过 $t$ 时刻已知的 $AB$ 两点的水力参数,可利用特征线法推知 $t+\Delta t$ 时刻 $P$ 点的水力参数。然而在输水系统的边界或节点上, $C^+$ 和 $C^-$ 方程中只有一个方程适用,或者 $C^+$ 和 $C^-$ 方程联立无法求解,导致特征线法无法推算下一时刻。如图2-5所示,将有压引水系统输水管道理想化成一根简单管, $A$ 点为临近水库的管道起始端, $B$ 点为临近水轮机的管道末端,此时,在计算 $A$ 点在 $t_0+\Delta t$ 时刻水力参数时,只有 $C^-$ 方程;而计算 $B$ 点时,只有 $C^+$ 方程,故无法求解。此时,需要通过引入辅助方程来限定 $H$ 和 $P$ ,即所谓的边界条件,并联立已有的相容性方程进行求解。在水电站的过渡过程计算中,可能涉及到边界条件有很多,例如上游水库、尾水渠、水轮机边界、串联管或分叉管节点、管道下游盲端、管道末端阀门(水轮机喷嘴)、阀门或阻原件、阻抗式调压室节点、差动式调压室节点、气垫式调压室节点、明满流分界节点、集中惯性原件等等,且颇为复杂,本文只介绍实际算例中所涉及的边界条件。

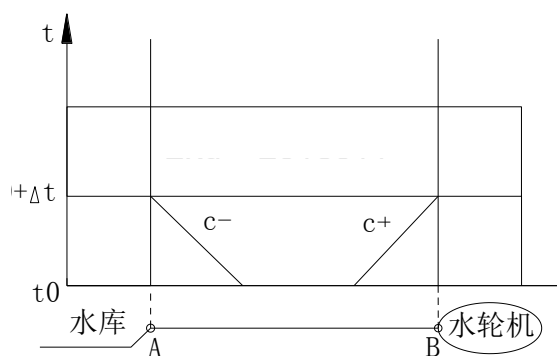


图 2-5 边界条件示意图

Fig 2-5 Schematic diagram of the boundary conditions

#### 2.3.1.1 上游水库和尾水渠节点

尾水渠的边界条件和上游水库相似。以上游水库为例,如图2-6所示上游水库节点,可写出 $C^-$ 方程:

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad (2-30)$$

管道水力瞬变时 $H$ 的变化速率要远大于水库水位 $H_p$ ,故略去其变化影响,视为常数,有:

$$H_P = H_{res} = \text{常数} \quad (2-31)$$

联立方程(2-30)和(2-31)并求解,可得流量 $Q_P = C_n + C_a H_{res}$ 。

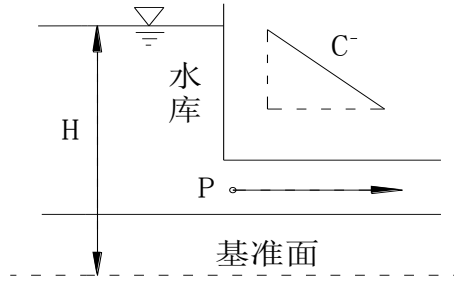


图 2-6 上游水库节点

Fig 2-6 Node of upstream reservoir

对应地,对于尾水渠节点,可写出  $C^+$  方程,并假定下游水位恒定 ( $H_p = H_D = \text{常数}$ ),可求出流量  $Q_p$ 。

### 2.3.1.2 串联管道及分岔管节点

在研究串联管道和分叉管节点时不考虑水体容积损失,故在水力瞬变过程中,图 2-7、2-8 控制体上节点满足压力相等及流量连续。图 2-7 中 1 号管道相对于 2 号管道是异径管道,且水力特性可能不同,故应分别建立特征方程。

对 1 号管起始端节点,有  $C^+$  特征方程:

$$Q_{p1} = C_{p1} - C_{a1}H_{p1} \quad (2-32)$$

对 2 号管末端节点,有  $C^-$  特征方程:

$$Q_{p2} = C_{n2} + C_{a2}H_{p2} \quad (2-33)$$

节点无限小,故不考虑沿程水头损失,同时略去节点处局部水头损失,则有连续方程:

$$Q_{p1} = Q_{p2} = Q_p, \quad H_{p1} = H_{p2} = H_p \quad (2-34)$$

由(2-32)~(2-34)联立求解,得:

$$H_p = \frac{C_{p1} - C_{n2}}{C_{a1} + C_{a2}} \quad (2-35)$$

将上式代入方程相容性方程,可得出  $Q_p$ 。

同理,对图 2-8 所示分岔管节点,可建立连续方程:

$$Q_{p1} = Q_{p2} + Q_{p3} \quad (2-36)$$

$$H_{p1} = H_{p2} = H_{p3} = H_p \quad (2-37)$$

对 1 号、2 号及 3 号管道分别有特征方程:

$$Q_{p1} = C_{p1} - C_{a1}H_{p1} \quad (2-38)$$

$$Q_{p2} = C_{n2} + C_{a2}H_{p2} \quad (2-39)$$

$$Q_{p3} = C_{n3} + C_{a3}H_{p3} \quad (2-40)$$

联立求解方程(2-36)~(2-39),可得:

$$H_p = \frac{C_{p1} - C_{n2} - C_{n3}}{C_{a1} + C_{a2} + C_{a3}} \quad (2-41)$$

将式(2-40)分别代入方程(2-37)~(2-39), 可求得各分岔节点处的流量。

这里例举的是一根管在一点分成二个支管, 若一根总管(编号为  $n+1$ ) 在某一点分为  $n$  个支管(编号  $1, \dots, n$ ), 则可有连续方程

$$Q_{p_{n+1}} = \sum_{i=1}^n Q_{Pi} \quad (2-42)$$

$$H_p = \frac{C_{p_{n+1}} - \sum_{i=1}^n C_{ni}}{\sum_{i=1}^{n+1} C_{ai}} \quad (2-43)$$

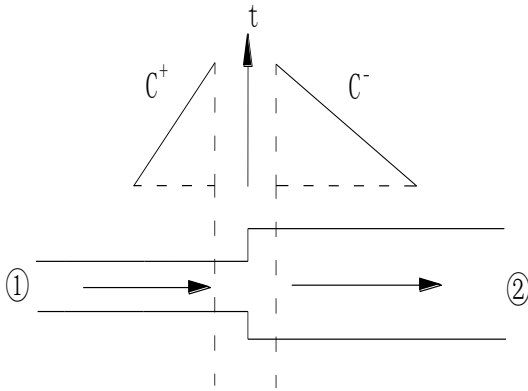


图 2-7 串联管道节点  
Fig 2-7 Node of pipes in series

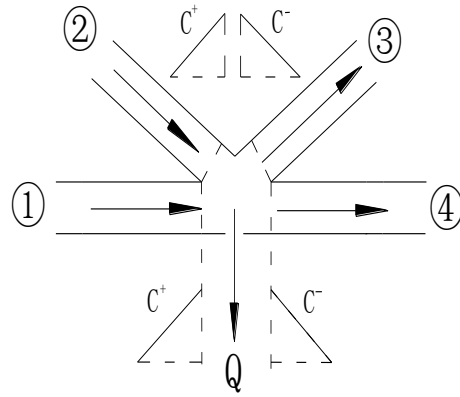


图 2-8 分岔管道节点  
Fig 2-7 Node of branch pipes

### 2.3.1.3 阻抗式调压室节点

阻抗式调压室设置在靠近厂房的输水管道上, 通过阻抗孔与输水管道联通, 其结构与节点分布如图2-9所示。

通常情况下的调压室涌波计算应当采用Fourth-order Runge-Kutta method<sup>[36]</sup>, 该方法针对电算时效果好, 精度高, 但通常用于对调压室涌波的独立计算。然而应用特征线法进行水击计算时, 在考虑调压室和水击互相作用的前提下无法将调压室独立于过水系统之外, 故而本文采用特征线法对调压室涌浪及管道水击进行联合计算时, 仍然将调压室看做一个边界条件进行处理。

对如图2-9所示管道1末端节点可写出  $C^+$  特征方程:

$$Q_{p1} = C_{p1} - C_{a1} H_{p1} \quad (2-44)$$

对管道2起始节点可写出  $C^-$  特征方程:

$$Q_{p2} = C_{n2} + C_{a2} H_{p2} \quad (2-45)$$

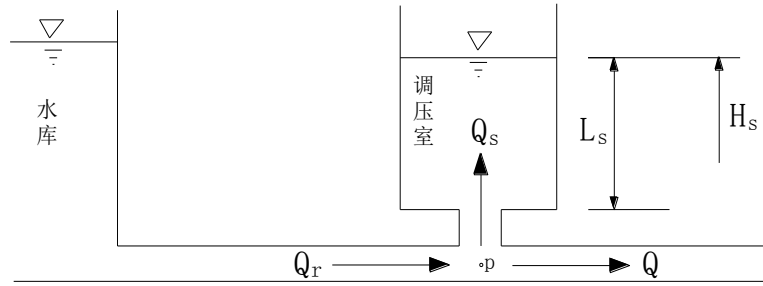


图 2-9 调压室节点

Fig 2-9 Node of surge chamber

然而调压井情况相对其他基本边界条件而言更为特殊，其质量涌波和水击现象有内在联系，求解特征线方程时仍需要调压室基本方程的辅助，进而进行联立求解。如图2-9所示，假设 $P$ 点无限小，不计 $P$ 点容积损失，根据连续性原理，有连续方程：

$$Q_r = Q + Q_s \quad (2-46)$$

由于调压室水位变化速率在整个水力系统中相对较慢，故略去水流和室壁弹性的影响。易知调压室流量与水位的关系：

$$A_s \frac{dH_s}{dt} = Q_s \quad (2-47)$$

整理，得

$$H_s = H_{s0} + \frac{Q_s + Q_{s0}}{2A_s} \Delta t \quad (2-48)$$

忽略调压室底部的局部损失，有能量方程：

$$H_{P1} = H_{P2} = H_P \quad (2-49)$$

计入阻抗损失，略去调压室中水体惯性时，设调压室内水压力为 $H_s$ ， $P$ 点水压力为 $H_P$ ，有：

$$H_P = H_s + R_s |Q_s| Q_s \quad (2-50)$$

计入调压室内水体惯性，有

$$H_P = H_s + R_s |Q_s| Q_s + \frac{\gamma}{g} \times \frac{H_s + H_{s0}}{2} \times \frac{Q_s - Q_{s0}}{A_s \Delta t} \quad (2-51)$$

#### 2.3.1.4 水轮机边界条件

在特征线法的计算中，水轮机被视为节点，也需建立相应的边界条件。然而水轮机作为整个水电站过水系统中最为复杂的部件，其边界条件也相对复杂，提供的辅助方程

需要根据水轮机全特性曲线的瞬时数据与相容性方程联立求解。如图 2-10 所示，设蜗壳末端和尾水管出口处压力水头分别为  $H_{10}$  和  $H_{20}$ ，高程为  $H_1$ 、 $H_2$ ，流速为  $V_1$ 、 $V_2$ ，水轮机总水头为  $H_t$ ，对于水轮机节点，有水头平衡方程：

$$H_t = (H_1 + H_{10} + \frac{V_1^2}{2g}) - (H_2 + H_{20} + \frac{V_2^2}{2g}) \quad (2-52)$$

蜗壳末端的  $C^+$  方程为：

$$Q_1 = C_{p1} - C_a (H_1 + H_{10}) \quad (2-53)$$

若尾水管出口没有连接出水管，则  $H_2$  为水轮机下游水位，若尾水管出口与出水管连接，则出水管进口有  $C^-$  特征方程

$$Q_2 = C_{n2} + C_a (H_2 + H_{20}) \quad (2-54)$$

设蜗壳末端流量为  $Q_1$ ，尾水管出口流量为  $Q_2$ ，略去容积损失，在水轮机边界处有流量连续方程：

$$Q_1 = Q_2 = Q_t \quad (2-55)$$

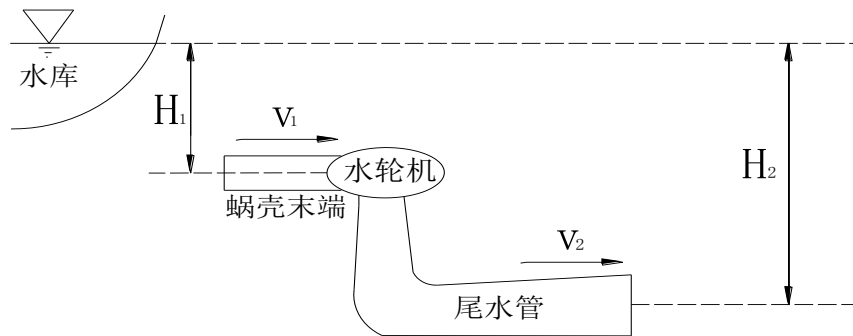


图 2-10 水轮机节点示意图

Fig 2-10 Schematic diagram of node of the hydro-turbine

### 2.3.2 时间步长

本文在介绍特征线法的时候已经提过，为满足 Courant 稳定条件，同时最大限度地节省计算时间，最优时间步长的选取应符合方程：

$$\Delta t = L / \lambda \quad (2-54)$$

然而，这是在将整个有压引水系统理想化为一根简单管的假设下。在水电站水击计算中，这种假设显然不可能成立。实际工程中，管道管路通常由许多段不同性质、不同管径的管道组成，不妨根据管路特性将管道分为  $k$  类，每类管道的分段数为  $N_i$ ，长度为

$L_i$ ，相应波速为  $a_i$ ，为满足数值稳定，所有时间步长必须相同，将式（2-54）变为：

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i N_i} (i = 1, 2, 3, 4, \dots, k) \quad (2-55)$$

显然，很难使每类管路的  $\frac{L_i}{a_i N_i}$  严格一致，所以  $\Delta t$  也难以取值。但由于不可能精确地知道波速，故引入未知量  $\psi_i$  作为波速允许偏差率，上式可变换为：

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i (1 + \psi_i) N_i} (i = 1, 2, 3, 4, \dots, k) \quad (2-56)$$

这样一来，便可通过调整  $\psi_i$  来寻找合适的  $N_i$  以保证时间步长一致。然而  $\psi_i$  也并非可以无限制调整，根据经验， $\psi_i$  一般小于  $\pm 0.15$ 。

## 2.4 蜗壳和尾水管的当量化

特征线法默认水流为一元流，故要求管路为等径圆管，然而在水电站水击计算中，涉及到的不规则的管路有很多，如渐变管段、尾水管、蜗壳、局部连接短管等等。实际上，倘若我们用理想的等径管来替代真实流道，在保证各条理想等径管的长度、沿程损失、波速、加权动量等参数与真实流道相同等情况下，并将被替代的真实流道中的局部水头损失均摊入沿程损失，则在实际计算中并不会出现较大失真。这种理想等径管叫做当量管，替代真实流道的过程称之为当量化。下面介绍本文涉及到的蜗壳和尾水管当量计算的过程，主要任务是求当量长度和当量面积。

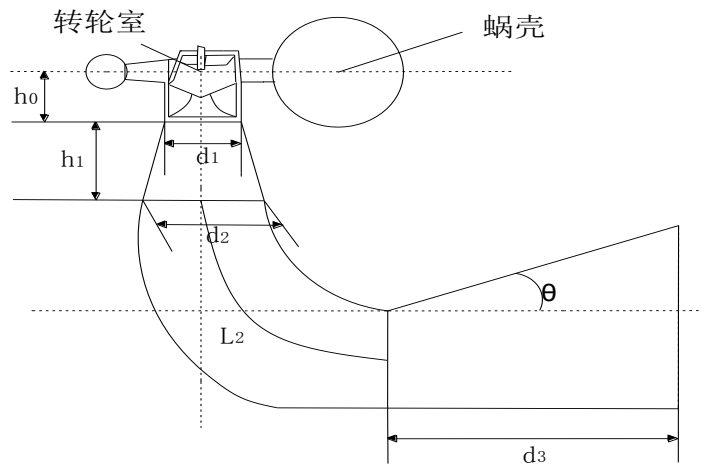


图 2-11 (a) 尾水管侧视图

Fig 2-11 (a) side view of draft tube

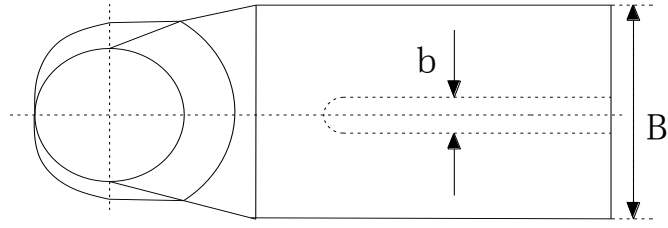


图 2-11 (b) 尾水管俯视图

Fig 2-11 (b) vertical view of draft tube

### 2.4.1 蜗壳的当量化

由于蜗壳设计大都近似符合等速度矩律，蜗壳的当量长度可以取蜗壳实际展开长度的一半，即蜗壳中心线长度的二分之一，而当量面积可以认为是蜗壳进口截面面积，一般情况下可以满足计算精度要求。

### 2.4.2 尾水管的当量化

尾水管结构如图 2-11 所示。

设  $L_{de}$  为当量管长度，易知尾水管当量长度为  $h_1 + L_2 + L_3$ 。在不考虑水体和尾水管壁弹性的前提下，略去容积损失，有

$$L_{de} = h_1 + L_2 + L_3 \quad (2-57)$$

$$H_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = H_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} + h_{w1-2} + \frac{1}{g} \frac{dQ}{dt} \int_l \frac{dl}{A} \quad (2-58)$$

式中 1、2 下标分别代表尾水管进出口， $h_{w1-2}$  为尾水管内水头损失，下同。由于：

$$\int_L \frac{dl}{A} = \int_0^{h_1} \frac{dl}{A} + \int_0^{L_2} \frac{dl}{A} + \int_0^{L_3} \frac{dl}{A} \quad (2-59)$$

于是有

$$\frac{L_{de}}{A_{de}} = \int_0^{h_1} \frac{dl}{A} + \int_0^{L_2} \frac{dl}{A} + \int_0^{L_3} \frac{dl}{A} \quad (2-60)$$

设  $d$  为直径，设  $e_1 = \int_0^{h_1} \frac{dl}{A}$ ， $e_2 = \int_0^{L_2} \frac{dl}{A}$ ， $e_3 = \int_0^{L_3} \frac{dl}{A}$ ，对于锥管，有

$$e_1 = \int_0^{h_1} \frac{dl}{A} = \frac{4}{\pi} \int_0^{h_1} \frac{dl}{(d_1 + k_1 l)^2} \quad (2-61)$$

对扩散管，有

$$e_2 = \int_0^{L_3} \frac{dl}{A} \approx \frac{1}{B-b} \int_0^{L_3} \frac{dl}{h_3 + lk_2}$$

对于肘管， $e_3$  计算相对复杂。若设  $A$  为肘管任一断面面积， $l$  为沿肘管轴线长度， $\bar{A} = A/A_1$ ， $z = l/d_2$ ，则肘管段断面符合图 2-13 的变化规律。

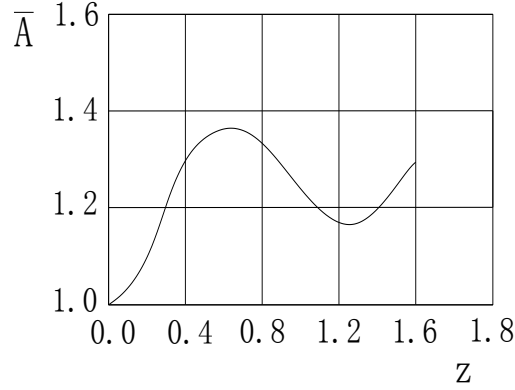


图 2-12 肘管段断面变化规律

Fig 2-12 The change regulation of section of draft tube

此时，利用最小二乘法进行曲线拟合，有

$$\frac{1}{\bar{A}} = 1 - 1.067z + 1.277z^2 - 0.4346z^3 \quad (2-62)$$

则有

$$e_3 = \int_0^{L_2} \frac{dl}{A} = \frac{d_2}{A_1} \int_0^z \frac{dz}{\bar{A}} = \frac{d_2}{A_1} \left[ \frac{L_2}{d_2} - 0.534\left(\frac{L}{d_2}\right)^2 + 0.426\left(\frac{L}{d_2}\right)^3 - 0.109\left(\frac{L}{d_2}\right)^4 \right] \quad (2-64)$$

设尾水管的当量面积为  $A_{de}$ ，有

$$A_{de} = \frac{h_1 + L_2 + L_3}{e_1 + e_2 + e_3} \quad (2-63)$$



### 3 长隧洞有压引水式电站过渡过程分析与 MATLAB

长隧洞有压引水式电站的过渡过程工况最为危险，且计算也最为复杂，故本文选择此类型电站进行过渡过程的研究。引水式电站常常为了保障过渡过程安全、改善过渡过程品质而设立上游或下游调压室。与输水管道联通的调压室在反射水击波的同时，其质量涌波又和水击互相作用，往往使过渡过程计算变得更为复杂。本文将利用特征线法，进行水击与调压室涌波之间的联合计算。

#### 3.1 过渡过程主要研究对象

长隧洞有压引水式电站水力系统过渡过程主要研究对象为引水隧洞、调压室、压力钢管、水轮机组四个方面。引水隧洞和压力钢管属于有压管道，其构造相对简单，其数学模型在第二章已详细介绍，在不考虑明满流分界节点的情况下只需考虑其几何尺寸、波速、糙率等参数，这些参数均可通过测量、查表、经验公式等较为简易的手段取得，故不赘述，下面主要介绍调压室和水轮机组。

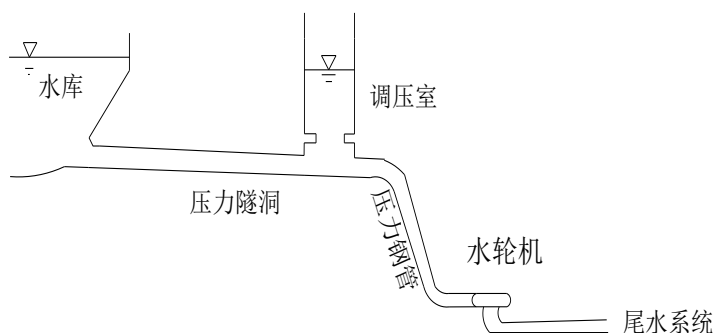


图 3-1 有压引水式电站

Fig 3-1 pressure diversion hydropower station

##### 3.1.1 调压室

由于长隧洞有压引水式电站有压引水系统较长，可达万米以上。相应地，其水流惯性时间常数也较大，在不设置上游调压室的情况下，甚至可以超过 20 秒，导致水力瞬变时压力钢管末端压力巨大，这对安全生产威胁重大。

调压室又叫调压井、调压塔，根据用途的区别，可分为上游调压室和下游调压室两大类；根据工作原理的不同，可分为简单式、阻抗式、双室式、气垫式、差动式等，本文主要研究上游阻抗式调压室。调压室的极限水位以及稳定性问题都是过渡过程品质的

重要指标，调压室是水电站过渡过程研究的重要对象。

### 3.1.1.1 阻抗式调压室的功能

调压室在某种程度上讲相当于一个靠近厂房的自由水面，可以充分反射水击波，缓解水击压力，改善机组运行条件。

如图 3-2 所示，阻抗式调压室利用相对于调压室断面较小的短管或孔口与隧洞及压力管道连接起来，利用孔口或隔板造成局部阻力，消耗部分水能，可以有效地减小水位波动幅度，加快衰减速度，缓解调压室水位波动对过渡过程造成的不利影响。相应地，由于阻抗孔口的存在，其所需调压室的体积小于圆筒式，且在正常运行时水力损失较小，对于输水管道较长且水头相应较低的电站有很好的调节效果。但其缺点是由于阻抗的存在，水击波不能完全反射，倘若孔口直径选择过小会使水击压力恶化；而孔口太大就失去了设立阻抗孔口的意义，无法促进波动衰减。

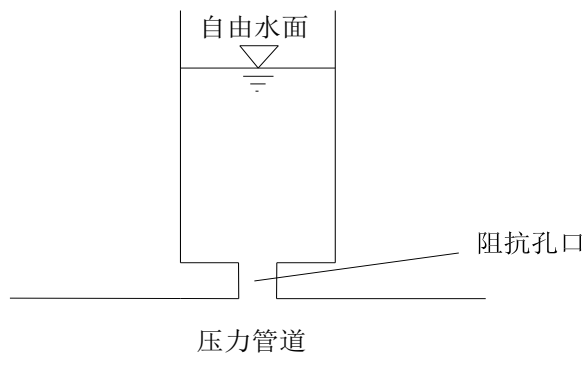


图 3-2 调压室结构示意图

Fig 3-2 Schematic diagram of structure of the surge tank

### 3.1.1.2 调压室的设置条件和建议

虽然调压室可以减缓水击压力，改善过渡过程品质，但从经济角度考虑，其工期长，造价高。另一方面，调压室的具体施工很大程度上受围岩稳定性的影响，甚至有些水电站的围岩稳定性根本不允许开挖调压室。围岩稳定性是指洞室围岩在因开挖而变化了的应力场中保持力学平衡状态的程度。影响围岩稳定性的因素有：围岩的岩性、完整性、岩体强度、均质性以及地应力状态和地下水的影响等，若忽视围岩稳定因素，可能对施工安全造成威胁。所以在过渡过程品质满足要求的情况下应尽量不设置调压室。

根据目前国内的水电站调压室设计规范，设置上游调压室的判别式为：

$$T_w = \frac{\sum L_i V_i}{gH} \geq [T_w] \quad (3-1)$$

其中， $T_w$  是水流惯性时间常数， $\sum V_i L_i$  是输水沿线每段管路流速与长度乘积之和， $H$  为水头， $g$  为重力加速度， $[T_w]$  为  $T_w$  在不设置调压室情况下的允许上限，设计规范给定范围为 2~4s，水电站单独运行或其容量在电力系统中所占的比重超过 50% 时， $[T_w]$

取值应靠近下限；水电站容量在电力系统中所占的比重小于 10%~20%时， $[T_w]$ 取值应靠近上限。当  $T_w$  超出所取的  $[T_w]$  值，就必须设置调压室。

显而易见的是，目前国内规范对电站是否需要设置上下游调压室的判别依据过于简化，仅仅给出了判别式，而对于一些围岩稳定条件不利于设置调压室且实际工程中可以利用其它手段调节过渡过程品质以满足生产需要的情况没有给出相应的建议。文献[39]初步讨论了当电站根据判据需要设置调压室而地质条件不利于围岩稳定时，超规范不设置调压室的方法，并以乐昌峡水力枢纽工程为例证明了其可行性。

对于调压室的设置，有以下建议：

(1) 调压室应在综合考虑围岩稳定和波动衰减的情况下选择最佳位置。传统观点认为调压室应尽量靠近厂房，因为根据 Thoma 公式，越靠近厂房，压力钢管造成的水头损失越小，越有利于波动衰减。然而文献[38]指出了以往线性地考虑调压室至厂房的距离与调保参数之间关系的认识误区，并通过数值分析的手段给出了参数随距离变化的具体曲线，引用实例对调压室位置与调节保参数之间的敏感度作出分析并得出了最佳临界位置。

(2) 调压室必须有足够的断面面积，并保证稳定，波动衰减迅速。

(3) 在额定工况附近正常运行时，调压室底部局部水头损失不能过大。

### 3.1.1.3 调压室在过渡过程中的水力计算

对于大波动过渡过程，调压室方面的水力计算有调压室极限浪涌；对于小波动过渡过程，水力计算主要目的是解决调压室稳定性问题。

## 3.1.2 水轮发电机组

### 3.1.2.1 调速系统

本文所涉及的并联PID型调速器数学模型如下：

$$e = x_l - x \quad (3-2)$$

$$\frac{du_1}{dt} = K_p \frac{du_1}{dt} + K_I e + K_D \frac{d^2 e}{dt^2} \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} u = 0 (u_1 < 0) \\ u = u_1 (0 < u_1 < 0) \\ u = y_L (u_1 > y_L) \end{cases} \quad (3-4)$$

$$s_1 = u - y \quad (3-5)$$

$$\begin{cases} s = s_L (|s_1| < s_L) \\ s = s_L \frac{s_1}{|s_1|} (|s_1| \geq s_L) \end{cases} \quad (3-6)$$

$$T_y \frac{dy}{dt} = s \quad (3-7)$$

导叶关闭规律可以描述为

$$\begin{cases} y = f(t) \\ \alpha = f(y) \end{cases} \quad (3-8)$$

### 3.1.2.2 水轮机

水轮机在过渡过程中的瞬时特性主要从水轮机全特性中获取的力矩特性和流量特性中体现。水轮机流量和力矩特性可以表示为：

$$Q_1' = f(\alpha, n_1') \quad Q = Q_1' D_1^2 \sqrt{H} \quad (3-9)$$

$$M_1' = f(\alpha, n_1') \quad M_t = M_1' D_1^3 H \quad (3-10)$$

取相对值

$$x_1' = \frac{n_1'}{n_{1r}'} = \frac{n D_1}{\sqrt{H}} \bigg/ \frac{n_r D_1}{\sqrt{H_r}} = \frac{\bar{x}_0 + \beta}{\sqrt{\bar{h}_0 + \xi}} \quad (3-11)$$

$$\bar{q} = \frac{Q}{Q_r} = \frac{Q_1' D_1^2 \sqrt{H}}{Q_{1r}' D_{1r}^2 \sqrt{H_r}} = q_1' \sqrt{\bar{h}_0 + \xi} \quad (3-12)$$

$$\bar{m}_t = \frac{M_t}{M_r} = \frac{M_1' D_1^3 H}{M_{1r}' D_{1r}^3 H_r} = m_1' (\bar{h}_0 + \xi) \quad (3-13)$$

$$\text{其中: } \frac{n}{n_r} = \frac{n_0 + \Delta n}{n_r} = \bar{x}_0 + \beta; \quad \bar{x}_0 = \frac{n_0}{n_r}; \quad \frac{H}{H_r} = \frac{H_0 + \Delta H}{H_r} = \bar{h}_0 + \xi; \quad \bar{h}_0 = \frac{H_0}{H_r}; \quad q_1' = \frac{Q_1'}{Q_{1r}'};$$

$$m_1' = \frac{M_1'}{M_{1r}'}。$$

水轮机参数变化可表示为：

$$q_1' = f(\alpha, x_1')$$

$$m_1' = f(\alpha, x_1')$$

$$\bar{q}_A' = q_1' \sqrt{\bar{h}_0 + \xi_A'}$$

$$\bar{m}_t = m_1' (\bar{h}_0 + \xi_A')$$

$$x_1' = \frac{\bar{x}_0 + \beta_t}{\sqrt{\bar{h}_0 + \xi_A'}}$$

## 3.2 过渡过程研究的主要任务

过渡过程的计算是对水电站整个水利系统整体布置的合理性评估，设计方通过计算，依据相应的过渡过程参数提出整改措施来为水电站提升过渡过程品质提供参考依据。过渡过程的计算可以是在水电站设计阶段，也可以是在水电站落成之后。例如在水电站建成之前，可以通过合理的计算给出输水管道几何尺寸及布置方式，压力钢管壁厚，机组  $GD^2$ ，是否设置调压室、调压阀，若设置调压室则给定具体种类、尺寸和结构等建议。若水电站业已落成而过渡过程品质达不到相应指标，则应通过相应的过渡过程计算

给出合理的过渡过程参数，并通过选择合理的导叶关闭规律等手段来实现过渡过程的改善。

对于大波动过渡过程，具体计算任务有：压力钢管末端和尾水管进口最大、最小压力、最大转速变化率、调压室极限涌浪水位、输水沿线的重要节点的测压管水头值，以及各个参数对应的过渡过程曲线。对于小波动过渡过程，计算其调压室稳定断面面积，给出合理的调速器整定参数，并通过控制工况证明其波动的衰减性，分析“引水隧洞—调压室”稳定性问题。

### 3.3 大波动过渡过程

大波动过渡过程通常指水电站机组突增或突减负荷超过百分之十的情况。在此期间，调压室水位波动幅度较大，机组转速变化迅速且幅度较大，管道压力随压力波变化剧烈，是对水电站安全运行威胁最大的工况。

#### 3.3.1 压力及转速变化计算

水击计算在第二章已经有了详尽的阐释，根据第二章所述的计算方法和已知的边界条件、特征方程，通过电算求出输水系统任一点的压力变化曲线并非难事，故在此不再赘述，下面介绍转速变化计算。

求过渡过程最大转速变化率是较为重要的一项调保参数，而其经验公式现在已在工程实例中成熟运用。但在过渡过程计算当中，仅仅求出最大转速变化率是不够的，研究导叶折线、曲线关闭规律时还需要详尽的转速变化曲线。若想获得转速变化曲线，就要对水轮机瞬态转速进行研究。

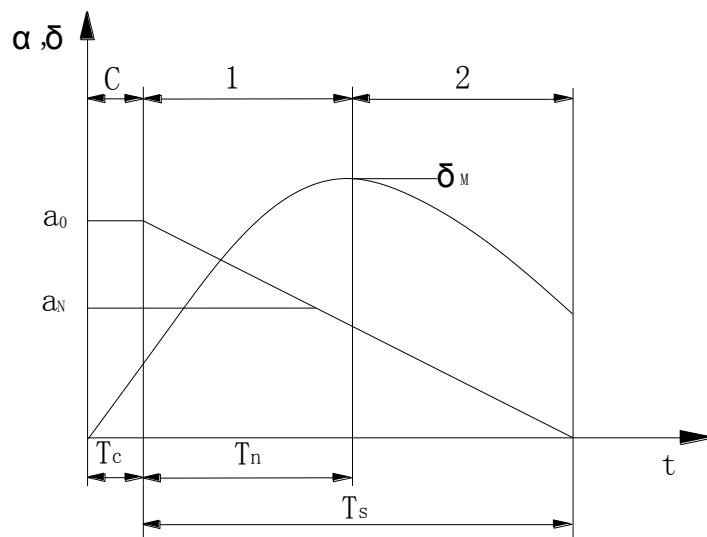


图 3-3 机组转速上升分段

Fig 3-3 Different periods of speed up of turbine unit

对于瞬态转速的求解，著名学者常近时建议根据时间将转速上升过程分为三段。C 段为导叶滞后时间段，其曲线即为导叶开度维持  $a_0$  不动时间  $T_c$  内转速变化率  $\delta$  自由上升，1 段为从导叶开始动作开始，转速达到极值的时间段，2 段为机组转速从极值到零的过程。以横轴为时间轴，纵轴为转速和开度轴作图 3-3。

然后根据每一段不同的特性给出每一时刻转速变化率  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_c$  的计算公式，从而获得转速变化曲线。这种计算虽然精确，但也并非绝对意义的瞬态转速，也有其假设前提。如今应用电算和特征线法之后，转速变化可以粗略地在较短时间步长  $\Delta t$  内视为线性，从而使求解瞬态转速变得简单。有运动方程：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (3-14)$$

在水轮机丢弃全部负荷后，忽略不稳定水流的影响，阻力矩  $M_g$  可看作是 0，根据微分思想，在较短时间  $\Delta t$  内，将水轮机力矩视为线性变化，使用梯形积分公式对积分后，有

$$\omega_t - \omega_{t-\Delta t} = \frac{M_t + M_{t-\Delta t}}{2J} \Delta t \quad (3-15)$$

易知  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ ，根据  $GD^2$  定义有  $J = \frac{GD^2}{4g}$ ，再根据上式，可以推得

$$n_t = n_{t-\Delta t} + \frac{187.5\Delta t}{GD^2} (M_t + M_{t-\Delta t}) \quad (3-16)$$

设  $\beta$  为机组转速上升率， $\bar{m}_t$  为力矩相对值， $T_a$  为机械惯性时间常数，有  $\beta = \frac{n - n_0}{n_r}$ ，

$\bar{m}_t = \frac{M_t}{M_r}$ ， $T_a = \frac{GD^2 n_r^2}{3580 P_r}$ ，联立上式，有

$$\beta_t = \beta_{t-\Delta t} + \frac{\bar{m}_t + \bar{m}_{t-\Delta t}}{2T_a} \Delta t$$

### 3.3.2 调压室最高涌浪水位的计算

当有压引水隧洞糙率值取最小可能值，压力钢管糙率值取最大可能值，上游水库水位取最高（即设计洪水位）的时候，共用上游调压室的所有机组在满载运行的前提下同时与电网解列，甩弃全部负荷时调压室涌浪的最高水位即为调压室最高涌浪水位。其计算原理为之前章节介绍的调压室方程，本文所采用的特征线法水击与调压室浪涌联合计算可以求出其瞬态水位及过渡过程历程线。

### 3.3.3 调压室最低浪涌水位的计算

当有压引水隧洞糙率值取最大可能值，压力钢管糙率值取最小可能值，上游水库水位取最低（即死水位）的时候，共用上游调压室的所有机组由空载突增至满载的时候，调压室涌浪的最低水位即为调压室涌浪最低水位。然而工程实例中这种情况几乎不可能

发生，故在设计中常以如下工况定义调压室最低涌浪水位：

1. 上游水库取最低水位（死水位），设共用上游调压室的有  $n$  台机组，1 台机组空载运行， $n-1$  台机组满负荷运行，此时，突然将空载运行的机组增至满负荷。

一般情况下这种工况所计算得到的调压室最低涌浪水位可以满足设计和生产需要，然而在考虑误差之后，对于调压室最低涌浪水位有校核工况：

2. 上游水库取最低水位（死水位），压力钢管糙率值取可能最大可能值，共用调压室的  $n$  台机组同时突甩满负荷。

此时取调压室水位波动的第一波谷作为校核值，调压室最低浪涌值在两者之间取最小。值得注意的是，应当保持调压室最高浪涌在调压室设计高程之内，且留有足够安全余量；保持调压室最低涌浪水位在压力钢管顶部高程三米以上，以避免使气体混入引水道，发生调压室漏空。

### 3.3.4 改善大波动过渡过程的主要手段

#### 3.3.4.1 增加机组 $GD^2$

$GD^2$  是发电机转动部分的重量与其惯性直径平方的乘积，简称机组飞轮力矩。增加机组  $GD^2$  对转速上升有明显的改善效果，且对小波动稳定有一定的促进作用。增加机组  $GD^2$  通常是指增加发电机飞轮力矩，因为水轮机重量只占机组很小一部分。然而发电机  $GD^2$  不可能无限增加，并且增加机组  $GD^2$  意味着投资成本的增加，故而其改善大波动过渡过程的能力有限。

#### 3.3.4.2 设置调压装置

调压室可以迅速为输水系统贮水、补水、反射水击波，以调节压力钢管末端压力。设置调压室对减少水流惯性时间常数  $T_w$  有明显作用。一般情况下，在设有调压室的有压引水式电站在计算  $T_w$  值时可以略去引水隧洞。然而调压室投资巨大，对于发电量较小的中小型电站显得不甚经济。在  $T_w$  值超出标准但幅度不大的中小型电站，可以考虑使用调压阀代替调压室。调压阀的原理相当于泄水孔，它可以在水击压力上升时打开泄水，以保证管道压力在合理范围之内。

#### 3.3.4.3 改变导叶启闭规律

选择合理的导叶启闭规律可以很好地缓和水击压力上升和机组转速上升这一矛盾，也是目前最为经济的改善大波动过渡过程的手段。若直线关闭规律不能满足调保计算需求，则可采用分两段、三段关闭进行改善。若技术成熟，也可采用曲线关闭、非固定模式导叶关闭规律，这都对大波动各项参数改善效果明显。

### 3.4 小波动过渡过程

小波动过渡过程通常是指水电站机组突增或突减负荷不超过百分之十时的过渡过程。当小波动过渡过程发生时，压力钢管末端和尾水管进口压力相对变化较小，机组转速变化幅度也相对较小。

#### 3.4.1 小波动过渡过程计算

小波动过渡过程计算的主要目的是通过仿真输出的小波动过渡过程主要参数的曲线，从而分析调压室系统稳定性和过渡过程品质。虽然本文采用了考虑弹性水击的特征线法进行水力瞬变计算，为了处理转速变化特性和调速系统特性，仍然需要引入刚性水击的状态方程描述方法。具体计算流程如下：

- (1) 利用特征线法计算主要节点的瞬时水头及流量；
- (2) 依据 3.1 中介绍的机组运动方程以及调速器特性的状态方程计算机组瞬时转速的相对值和接力器行程；
- (3) 根据上述计算机组的瞬时过机流量和进出口水头。

利用电算求出每个时间步长的参数并加以插值，就得出了整个小波动过渡过程的参数变化曲线。

对于已经落成的电站，通过小波动计算，给定合理的调速器参数，其不稳定状态会被调速器自动解决，一般不会对电站安全生产构成威胁。但尽管如此，由于小波动问题是调压室稳定性问题的关键，涉及水电站调压室断面和引水隧洞的开挖，故小波动研究依然是水电站过渡过程研究重要的一部分。

调压室稳定性问题又称“隧洞—调压室”稳定问题，调压室产生不久，前辈学者们就在水力系统中发现了一种并非水击波，但依然能对过渡过程品质造成影响的波动，即调压室涌波，它与水击波互相作用，对电能质量造成影响。并且发现，这种波动并非无条件衰减，还有可能波动幅度随时间增大，引起机组不稳定。经研究发现，相对于大波动而言，小波动是调压室稳定性问题的关键点，若调压室波动在小波动过渡过程时不衰减，则其在大波动过渡过程时必然不会衰减。于是小波动过渡过程与调压室稳定性问题联系起来，逐渐被人们重视。

#### 3.4.2 Thoma 公式

早在二十世纪初，Thoma 就提出了保证调压室波动衰减的必要条件：

- (1) 有压引水系统的水头损失之和必须净水头的三分之一；
- (2) 调压室断面面积大于调压室波动稳定临界断面，又称 Thoma 断面。

Thoma 的假定条件是：1，波动为线性，扰动无限小；2，水电站孤立运行；3，调速器绝对灵敏，严格保证出力；4，忽略水轮机效率变化产生的影响。



对于 Thoma 提出的必要条件 (1)，几乎每个电站都可以满足，水头损失大于净水头三分之一的情況并不多见。问题的关键是条件 (2)，即调压室稳定断面面积。对于调压室断面，基于假定条件 Thoma 有如下论断：

$$\text{若} \quad A_s > A_c = \frac{L_T A_T}{2g\alpha(H_0 - h_{T0} - 3h_{w0})} = \frac{L_T A_T}{2g\alpha H_1} \quad (3-17)$$

则满足稳定必要条件；

若  $A_s < A_c$ ，则波动必不衰减。

式 (3-17) 即为著名的 Thoma 公式，其中  $A_s$  为调压室断面面积， $A_c$  为托马临界稳定断面面积， $L_T$  为压力引水道长度， $A_T$  为压力引水道断面面积， $g$  为重力加速度， $H_1$  为发电最小净水头， $h_{T0}$  为压力引水道水头损失， $h_{w0}$  为压力管道水头损失， $\alpha$  为自水库至调压室水头损失系数。对于有阻抗式调压室的引水系统， $\alpha$  的求解公式为：

$$\alpha = h_{T0}/V^2 + \frac{1}{2g} = \frac{L_T}{C^2 R} + \frac{\sum \xi}{2g} + \frac{1}{2g}$$

其中， $V$  为引水隧洞中的水流速度； $\sum \xi$  为引水隧洞的局部水头损失系数之和， $C$  为谢才系数， $C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$ ， $R$  为水力半径， $n$  为糙率；

### 3.4.3 影响 Thoma 断面的参数分析

#### 3.4.3.1 $H_1$ 值的影响

根据托马公式不难发现，想要降低临界断面面积，就应该使  $H_1$  值尽量大。通过分析公式  $H_1 = H_0 - h_{T0} - 3h_{w0}$  可知，想要放大  $H_1$  值有两种方法，一是扩大总水头  $H_0$ ，二是减少水头损失  $h_{T0} + 3h_{w0}$ 。

第一种方法通常并不可行，因为电站总水头在很大程度上是根据地形地貌确定的，人为可操作性不大。

对于第二种方法，减小隧洞及压力钢管糙率固然能减少水头损失。减小水头损失主要通过减小管道糙率和缩短压力钢管长度来实现。然而减小糙率可使  $\alpha$  值变小，且后者对稳定断面的影响权重远比前者要大，反而会使  $A_c$  增大，故不可行。缩短压力钢管长度对减少调压室稳定断面面积有显著效果，这就要求电站在设计阶段尽可能地合理布置输水系统。如若由于地形等因素不能缩短输水短管道总长度，适当地延长引水隧洞，缩短压力钢管长度，即使调压室靠近厂房，可以有效地减小水头损失，扩大  $H_1$ 。

另外，水轮机效率对  $H_1$  也有影响。根据 Thoma 的假设条件，忽略了水轮机效率变化的影响，即视水轮机的效率为常数，这显然是不精确的。为了贴近实际情况，引入上式中水轮机效率变化的无因次系数  $\Delta$ ，设  $H$  为恒定情况下的净水头，对于  $\Delta$ ，有

$$\Delta = \frac{H}{\eta_0} \frac{\Delta \eta}{\Delta H} \quad (3-18)$$

此时 Thoma 断面可以表示为

$$A_c = \frac{L_T A_T (1 + \Delta)}{2\alpha g [H_1 - 2h_{w0}(1 + \Delta)]} \quad (3-18)$$

根据综合特性曲线，绘制某水轮机  $\eta = f(H)$  关系曲线如图 3-4 所示。

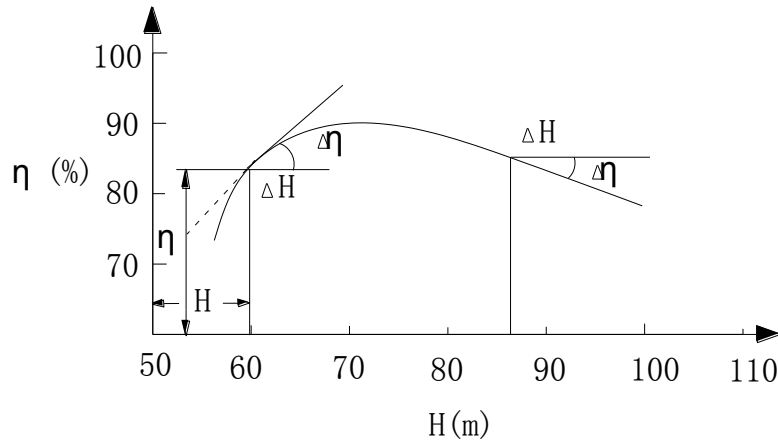


图 3-4 出力为常数时效率与水头的关系曲线

Fig 3-4 The relation curve of efficiency and water head while output is constant

可以看出，以曲线极值最高效率点为分界，极值左边  $\eta$  对  $H$  导数为正值，根据公式可增大  $A_c$  值；反之为负值，可减小  $A_c$  值。

#### 3.4.3.2 $\alpha$ 值的影响

从 Thoma 公式中不难看出，通过增大水头损失系数  $\alpha$  可以减小  $A_c$  值。计算公式

$$\alpha = h_{r0}/V^2 + \frac{1}{2g} = \frac{L_T}{C^2 R} + \frac{\sum \xi}{2g} + \frac{1}{2g} \text{ 中, 由于 } C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}, \text{ 增大 } n \text{ 值和减小水力半径 } R \text{ 可以}$$

放大  $\alpha$  值，所以适当加大管径、增加糙率也是缩小调压室稳定断面的有效手段。

#### 3.4.3.3 其他参数的影响

托马断面假定条件为水电厂孤立运行。然而随着我国电网系统的逐步建立与完善，现在很少有电厂孤立于电网之外。在并网运行中，由于系统可以保持稳定出力，故而调压室系统稳定性也得到了很好的改善。研究表明，当系统容量比所研究电站的机组容量大于或等于 3 倍时，调压室水位波动将无条件稳定。

### 3.5 基于 MATLAB 的特征线法电算

#### 3.5.1 本文选用 MATLAB 的原因

历史上主要的水击计算方法大致可以分为图解法、解析法、数值方法<sup>[18]</sup>，依赖计算机的数值方法成为当今主流。虽然当今的计算机技术在容量、精度、速度上的突破日新月异，各种可以运用于流体计算、绘图的软件也广泛普及，如 FLUNT, Tecplot, Phoenix 等等，但针对水电站过渡过程计算的权威软件仍未出现。MATLAB 是用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境，如今在水电站过渡过程的研究方面应用广泛。水电站过渡过程计算大多采用算法语言来编制仿真程序，但利用传统的算法语言编程不仅程序调试工作量大、仿真程序移植性差，且缺乏强有力的图形输出能力，很难适应水电站个性强的特点。而利用 MATLAB 编程改善了这些问题，并对带有复杂调压室的水电站计算方面展现出其优势<sup>[24]</sup>。但其缺点是程序完成后没有便捷的操作界面，编程者以外的人员不方便操作。另外，MATLAB 的仿真工具箱 SIMULINK 提供了非常丰富的系统库模型，不仅实现了可视化建模，还提供了多种数值算法。文献[37]给出了利用 SIMULINK 仿真建模进行调节保证计算的实例。

#### 3.5.2 过渡过程的电算方法

##### 3.5.2.1 前提条件

在第二章的时候已经提过，为了系统稳定，特征线法必须满足 Courant 稳定条件：

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|V + a|} \quad (3-19)$$

##### 3.5.2.2 计算步骤

特征线法是以  $\Delta t$  为时间步长，从  $t$  时刻推算  $t + \Delta t$  时刻，逐步计算完成过渡过程曲线绘制的。故而我们主要以其中一步为例进行分析。假设此刻已经通过各种手段获取了完整的原始数据，则有程序框图见图 3-5，计算步骤如下：

- (1) 输入  $t$  时刻完整数据；
- (2) 先利用 MATLAB 里的 interp 函数进行插值，再求出工况  $t$  时刻工况瞬时参数。
- (3) 为接力器控制方程设置适当的导叶关闭规律，并以此计算  $t$  时刻开度  $\alpha$ ；
- (4) 设定  $\xi_A'$  和  $\beta_t'$  的迭代初始值  $\xi_A^{t_1}$  和  $\beta_t'$ 。一般取前一时段的值为初值，或再加一个增量；

$$\xi_A^{t_1} = 2\xi_A^{t-\Delta t} - \xi_A^{t-2\Delta t}, \quad \beta_t' = 2\beta_{t-\Delta t} - \beta_{t-2\Delta t}$$

$$(5) \text{ 求 } x_1' \left( x_1' = \frac{1 + \beta_1}{\sqrt{1 + \xi_A'}} \right);$$

- (6) 利用 interp 函数插值查出  $q_1'$ ；

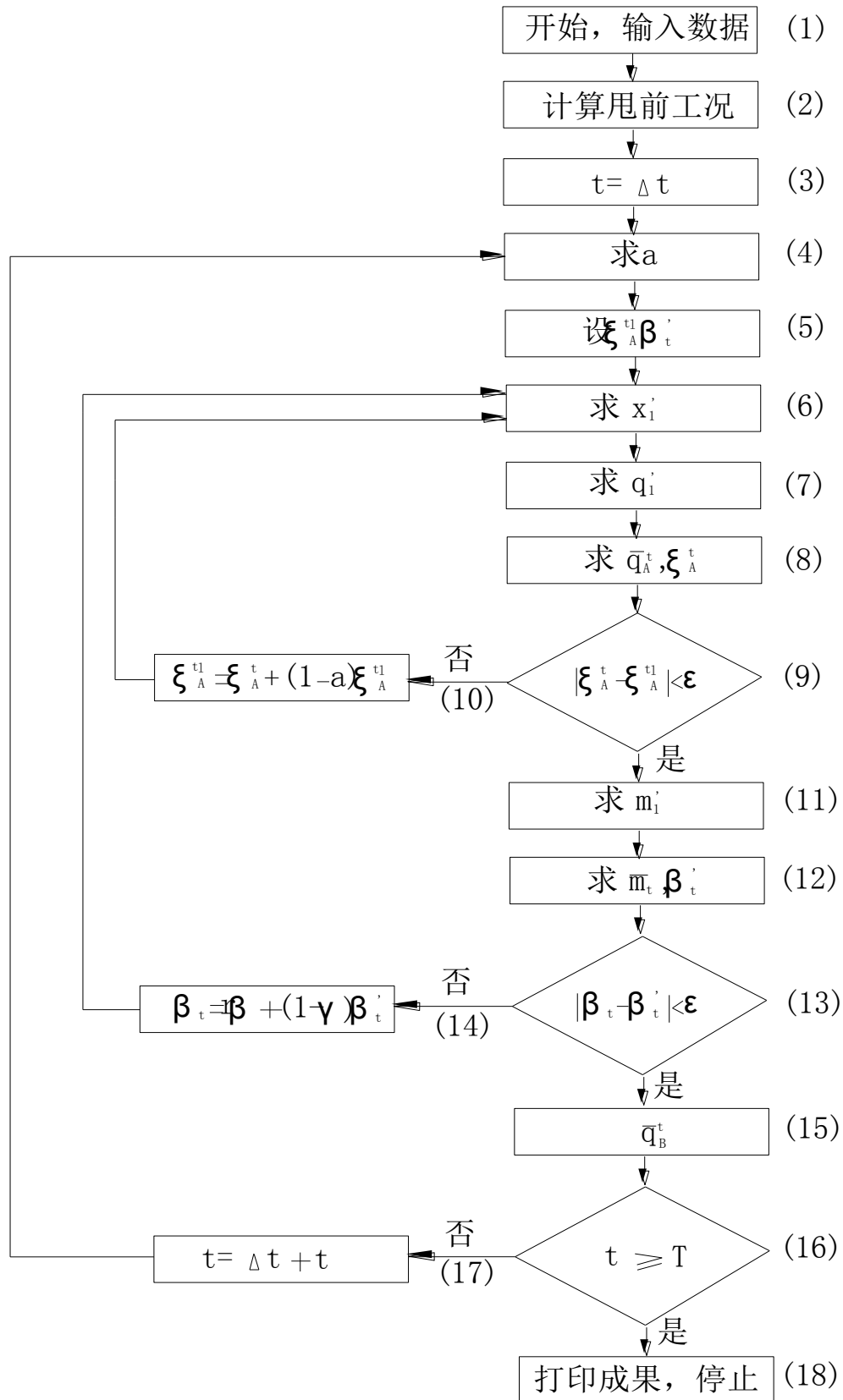


图 3-5 迭代计算程序框图

Fig 3-5 Program chart of iterative computations

(7) 联立方程

$$\begin{cases} \bar{q}_A' = q_1' \sqrt{h_0 + \xi_A'} \\ \bar{q}_A' = C_p' - C_a' \xi_A' \end{cases} \quad (3-20)$$

解其结果为

$$z = \frac{-q_1' + \sqrt{(q_1')^2 + 4C_a'(C_a' + C_p')}}{2C_a'} \quad (3-21)$$

$$\xi_A' = z^2 - 1 \quad (3-22)$$

由此可得  $\bar{q}_A'$ ;

(8) 检查  $|\xi_A' - \xi_A^{t_1}| < \varepsilon$  的条件是否满足 (暂定  $\varepsilon = 0.001$ )。如不满足, 则执行框 (10), 重新计算  $\xi_A^{t_1}$ 。

$$\xi_A^{t_1} = \varphi \xi_A' + (1 - \varphi) \xi_A^{t_1}$$

式中:  $0 < \varphi < 1$ , 再回至 (3) 计算。如条件满足, 则转入框 (11) 继续计算。

(9) 利用 interp 函数插值求取  $m_1'$ , 继而根据式(2-59)及(2-54)求得  $\bar{m}_t$  和  $\beta_t'$ ;

(10) 检查是否符合  $|\beta_t - \beta_t'| < \varepsilon$ 。如不符, 则执行框 (14), 重新计算  $\beta_t'$ 。

$$\beta_t' = \psi \beta_t + (1 - \psi) \beta_t'$$

若  $0 < \psi < 1$ , 应重新返回 (3) 计算。如符合, 则转入框 (15) 继续进行。

(11) 计算  $\bar{q}_B'$ ;

(12) 检查条件  $t \geq T$  是否满足。若不满足, 则转框 (17), 计算  $t = t + \Delta t$ , 然后转框 (4), 计算下一时段。条件满足时, 过渡过程计算结束, 并转框 (18);

(13) 结束, 打印成果。

## 4 工程实例分析

前些章节已经从理论上论述了基于 MATLAB 的长隧洞有压引水式电站过渡过程的计算原理和方法，但均未验证，诸多实际计算中的具体细节也仍未阐明。本章将通过工程实例中的仿真计算来分析长隧洞有压引水式电站过渡过程。

### 4.1 电站原始资料

X 电站在四川境内，该电站为闸坝引水式开发，位于雅砻江一级支流木里河干流，其电站主要原始资料如下：

#### (1) 水位：

上游：校核洪水位：	2317.40m
设计洪水位：	2315.81m
正常蓄水位：	2315.60m
死 水 位：	2314.00m
下游：校核洪水位：	2209.49m
设计洪水位：	2207.19m
正常尾水位：	2215.00m
设计尾水位	2213.00m

#### (2) 水头：

最大水头：	102m
全年加权平均水头：	88.3m
额定水头：	77.5m
最小水头：	77.2m

#### (3) 流量：

电站引用流量：	191.1m <sup>3</sup> /s
单机引用流量：	63.7 m <sup>3</sup> /s

#### (4) 主要动能参数：

装机容量：	132MW
调节库容：	19.6 万 m <sup>3</sup>
多年平均发电量：	6.306 亿 KW·h （联合）
	5.702 亿 KW·h （单独）
装机台数：	3 台
年利用小时数：	4777h （联合）
	4319h （单独）

保证出力: 38.7MW (联合)  
23.4MW (单独)

## (5) 泥沙:

多年平均输沙量:  $205 \times 10^4 \text{t}$   
 多年平均含沙量:  $0.565 \text{kg/m}^3$   
 多年平均汛期含沙量:  $0.85 \text{kg/m}^3$   
 全年过机泥沙平均含量:  $0.452 \text{kg/m}^3$   
 汛期过机泥沙平均含:  $0.765 \text{kg/m}^3$

表4-1 悬移质颗粒级

Tabel 4-1 particle levels of suspended load

粒径级 (mm)	0.007	0.010	0.025	0.050	0.1	0.25	0.35	1.0
小于某粒径级重量百分数 (%)	2.5	5.6	29.4	72.8	87	95.5	99.3	100

其中:

中值粒径: 0.033 mm  
 平均粒径: 0.0618 mm  
 最大粒径: 1.00 mm

悬移质矿物成份中以莫氏硬度小于 5 的软矿物为主, 绿泥石、绢云母、黑云母、碳酸盐、钛铁矿等占了 98% 以上, 莫氏硬度大于 5 的硬矿物为石英、长石, 约占 1.0—2.0%, 悬移质各粒径组莫氏硬度大于 5 的硬矿物含量见下表。

表4-2 悬移质各粒径组硬矿物含量

Tabel 4-2 Mineral content of different diameters of particles

粒径组 (mm)	1.0-0.5	0.5-0.25	0.25-0.10	0.10-0.05	<0.05
硬矿物含量 (%)	微量	1.0	2.0	2.0	1.0

## (6) 机组主要参数:

水轮机型号: HL160-LJ-334  
 额定出力: 45.138MW  
 转轮直径: 3.34m  
 额定转速: 170r/min  
 单位转速: 67.1r/min  
 单位流量:  $0.594 \text{m}^3/\text{s}$   
 额定流量:  $63.7 \text{m}^3/\text{s}$

额定点效率:	93.3%
比转速:	160m.kw
机组 $GD^2$ :	$3000t \cdot m^2$
水轮机安装高程:	2208.00m

(7) 管道布置:

有压引水隧洞全长 14853.9m, 洞径 9.1m, 进口高程 2297m, 18m 处设立检修闸门。末端高程 2278m。调压室开挖直径 27m, 阻抗孔口直径 5m, 底板高程 2281, 顶部高程 2347。压力管道主管管径 6.4m, 由上平段、竖井段和下平段组成。上平段长 35m, 竖井段长 80.8m, 下平段长 23.8m。主管末端分设支管, 支管管径 3.7m, 分别进入机组。管道糙率如下:

表 4-3 引水隧洞和压力钢管糙率

Tabel 4-3 Roughness of diversion tunnel and penstock

糙率	最大值	设计值	最小值
引水隧洞	0.014	0.013	0.012
压力钢管	0.013	0.012	0.011

(8) 尾水位与流量关系

表 4-4 尾水位与流量关系

Tabel 4-4 Relation of tail water level and flow

尾水位 (m)	2313.8	2314.2	2314.4	2314.7	2315.1	2315.5	2315.9
流量 ( $m^3/s$ )	15	60	85	115	145	175	205

## 4.2 原始计算数据的获取

### 4.2.1 流量特性和力矩特性的获取

目前处理水轮机边界的方法有两种。一种是内特性法, 在不需知道水轮机全特性曲线的前提下, 通过水轮机内部部件的特性来推知计算所需要瞬时的数据。这种方法虽然计算精度足够高, 然而一般来说, 水轮机的内部特性不易知晓, 本文未能取得 HL-160-LJ-334 水轮机的内部特性, 故不予采用。第二种方法是外特性法, 即根据水轮机的全特性曲线对水轮机边界条件进行处理, 获得计算所需要的流量和力矩特性, 并进行差值, 获得曲线以供查用。但全特性曲线需要进行大量实验才能得出, 每种比速的水轮机都只有其在高效区域附近的特性曲线, 目前国内常用比速的转轮拥有全特性曲线的寥寥无几。然而机组发生过渡过程时, 机组运行经历非常广阔的工况区域。因此, 常常



利用高效区附近的特性曲线和飞逸特性曲线补全全特性曲线。

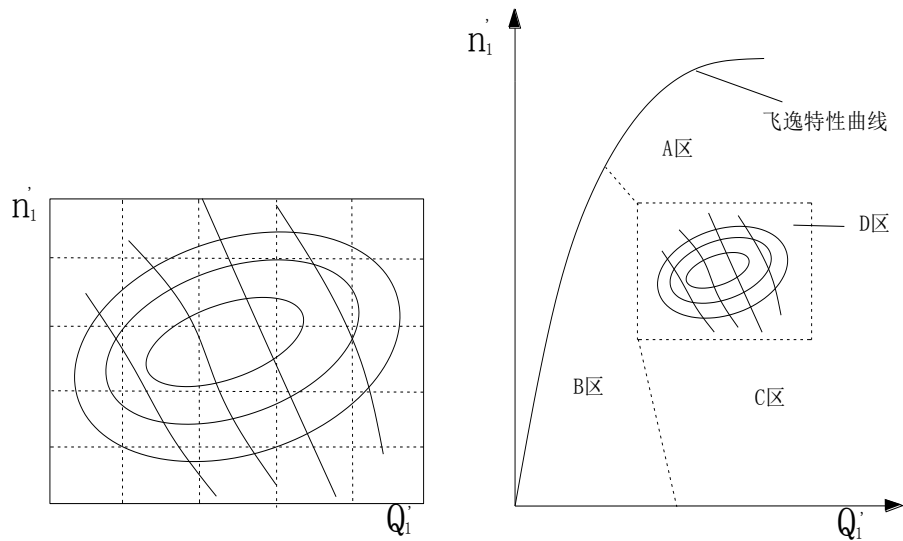


图 4-1 某水轮机转轮综合特性曲线在全特性曲线中的位置

Fig 4-1 One turbine synthetic characteristic curve in the fully characteristic curve

#### 4.2.1.1 飞逸曲线的补充

水轮机对应比速的转轮综合特性曲线一般给出的有介于最大和最小水头对应单位转速的飞逸特性曲线。我们容易知道，当单位流量为零时，单位转速为零。故而以最大飞逸单位转速和坐标原点为两个控制点，对原有飞逸特性曲线进行适当光滑延伸，就可以得到完整的飞逸曲线。

#### 4.2.1.2 小开度区域流量特性曲线的补充

如图 4-1 所示，小开度区的标号为 B。在转轮综合特性曲线上，做等单位转速线，与各个开度线和飞逸线相交；过原点和各交点作  $y \sim Q_1'$ （开度-单位流量）线，其中飞逸工况点与原点之间的部分线段即为要补充的小开度流量特性曲线。可得出在该单位转速下任一小开度工况对应的单位流量以及在模型综合特性曲线上的位置；由于需要选取若干单位转速，重复过程，就可以得到完整的单位流量特性曲线。

选择任一小开度值，在选定的等单位转速线上对应的  $y \sim Q_1'$ （开度-单位流量）线上查出对应某一单位转速和单位流量，在转轮综合特性曲线上标出该点，重复上述过程获得多个点，并将这些点光滑连接，就得到了小开度区的等开度线。

#### 4.2.1.3 效率特性曲线的扩展

在转轮综合特性曲线上做若干等单位流量线且与各个等效率线相交，将各点在  $n_1' \sim \eta$ （单位转速-效率）坐标系中绘出，并光滑连接，作适当延伸。将延伸的曲线在大单位转速和小单位转速上取点，并将这些点绘在转轮模型综合特性曲线上，光滑连接，可得大小单位转速区（图 4-1 中 A 区和 C 区）的效率特性曲线。做转轮综合特性曲线上做等单位转速线且与各个等效率线相交，将各点在  $Q_1' \sim \eta$ （单位流量-效率）坐标系中

绘出，并光滑连接，作适当延伸。将延伸的曲线在大单位流量和单位转速上取点，并将这些点绘制在转轮模型综合曲线上，光滑连接，可得大小开度区的效率特性曲线。

#### 4.2.1.4 等开度线的扩展

将等开度线光滑向上延伸，与飞逸工况线相交，并向高单位转速区适当拓展。依据经验公式获得零单位流量处的各开度线的单位流量值，并与其等开度线光滑连接，可得到完整的等开度线。

#### 4.2.1.5 零开度力矩特性

利用上述方法将综合特性曲线进行拓展，不难得出水轮机的全特性曲线，从而推知流量特性和力矩特性。然而零开度时的力矩特性曲线在全特性曲线上不易取得。因为单位力矩的公式为：

$$M_1' = 93740 \frac{Q_1' \eta}{n_1'} \quad (4-1)$$

此时，当单位流量为零（即零开度）时，根据公式单位力矩为零，显然不正确。经过研究发现，开度为零时，力矩为负值，其绝对值与单位转速的平方成正比，具体系数的求取可参照文献[37]。

#### 4.2.1.6 HL160-LJ-334 转轮流量特性与力矩特性表格及曲线

通过上述方法，现求得 HL-160-LJ-334 水轮机流量特性和力矩特性如表 4-5、4-6 所示：

表4-5 流量特性  
Tabel 4-5 Flow characteristics

$Q_1'$ $n_1'$ $\alpha$	0	2	4	6	10	14	18	22	26	30
0	0	81	152	210	315	443	550	630	655	718
10	0	89	155	214	318	450	546	625	682	721
20	0	94	156	212	325	452	546	624	680	730
30	0	90	158	213	330	455	549	625	693	731
40	0	91	156	215	335	457	547	628	691	739
50	0	90	155	216	334	455	546	630	694	744
60	0	83	150	213	327	448	543	634	695	750
70	0	70	140	199	319	440	540	625	696	745
75	0	65	135	189	309	435	533	620	696	744
80	0	63	125	182	300	430	526	618	695	742

表4-5 流量特性 (续)

Tabel 4-5 Flow characteristics (Continue table)

90	0	54	114	165	275	408	509	600	685	739
100	0	45	100	142	240	376	480	575	660	728
110	0	41	89	129	210	344	445	542	625	718
120	0	34	75	110	166	277	392	503	585	700
130	0	22	60	88	118	190	300	420	630	680

表4-6 力矩特性

Tabel 4-6 Torque characteristics

$M_1$ $n_1$ $\alpha$	0	2	4	6	10	14	18	22	26	30
0	0	20	36.1	47.5	78.9	101.8	119.5	129.8	134.5	137.8
10	-0.4	18.1	34.2	45.6	74.8	98.6	116.0	128.9	134.2	136.5
20	-1.6	15.5	31.5	43.1	70	93.9	111.9	125	132.3	133.4
30	-3.6	14	28.6	39.5	64.8	87.8	105.5	124	125.4	127.5
40	-6.4	11	24.5	35.3	58	80.3	95.9	108.2	116.6	117.8
50	-10	7.2	20.6	30.0	49.7	70.6	86.0	97.4	104.1	107.1
55	-14.4	1.3	13.6	23.3	39.8	60.6	75.9	88.2	93.4	96.1
60	-19.6	-3.8	7.2	16.6	33.3	50.6	65.4	76.1	82.2	84.6
65	-22.5	-7.2	3.2	12.2	29.5	45.1	58.6	69.6	76.4	78.1
70	-25.6	-10.1	0	8.2	25	39.8	51.8	62.8	70	71.1
75	-32.4	-17	-8	0	14	28.1	38.7	47.5	55.1	58.5
80	-40	-24.1	-16	-8.7	2.5	15.5	26.9	35	43.2	46.1
90	-48.4	-31	-24	-16.6	-8.1	2.0	11.4	17.5	28.8	29.4
100	-57.6	-39.8	-32.7	-25.6	-19.6	-10.4	-5.1	3.9	13	15.9
110	-67.6	-49.2	-40.3	-35	-30.5	-16.7	-13	-16.1	-8.1	-5.5

利用 MATLAB 的 interp 函数将流量特性、力矩特性表格进行 spline(三次样条插值)插值以供编程计算调用。插值后的流量、力矩特性曲线及其 3D 示意图如图 4-2~4-5:

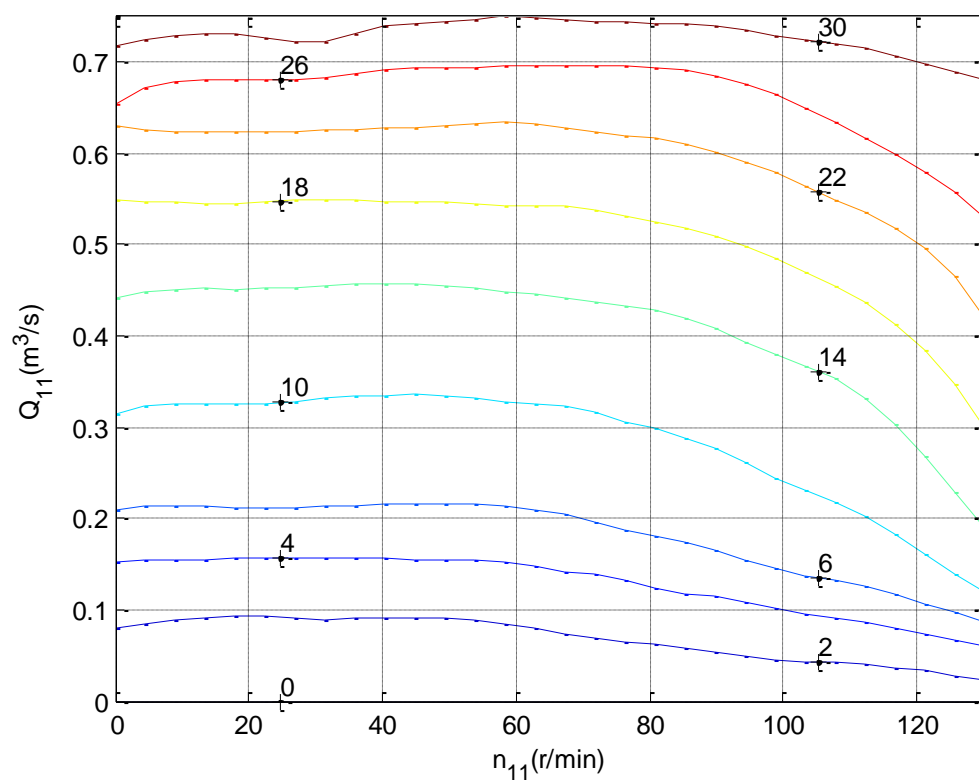


图 4-2 流量特性曲线

Fig 4-2 Curves of flow characteristics

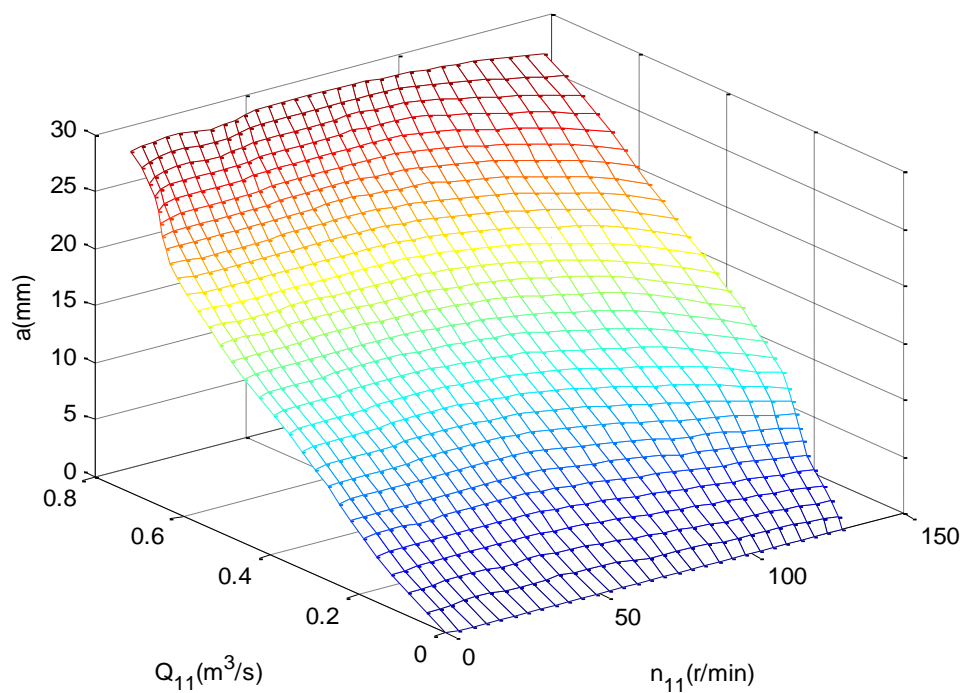


图 4-3 流量特性 3D 示意图

Fig 4-3 3D schematic diagrams of flow characteristics

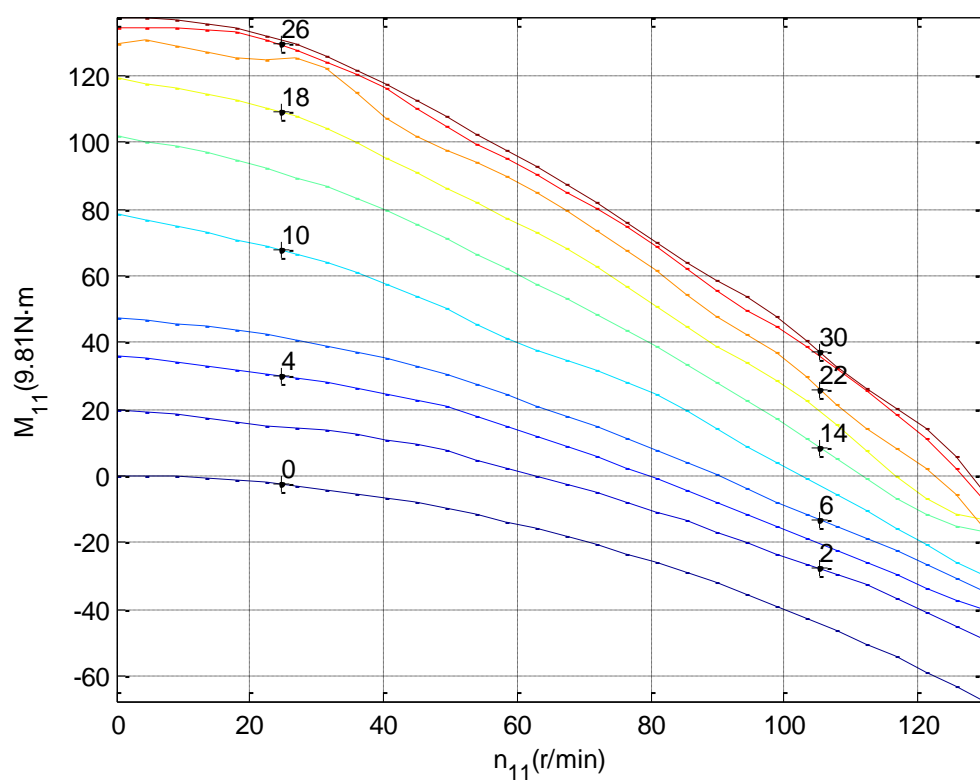


图 4-4 力矩特性曲线

Fig 4-4 Curves of torque characteristics

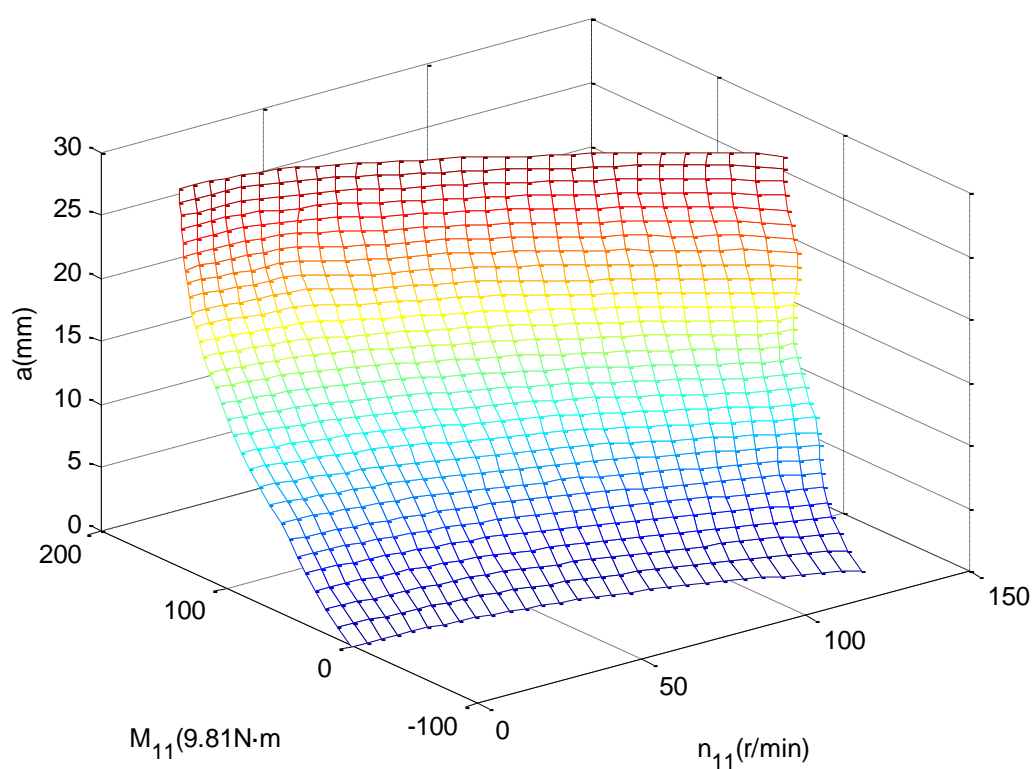


图 4-5 力矩特性 3D 示意图

Fig 4-5 3D schematic diagrams of torque characteristics

## 4.2.2 管道的分段及当量化

根据管路特性的不同，故而将 X 电站整个过水系统分为十一段，以便当量化。如图 4-6 所示：

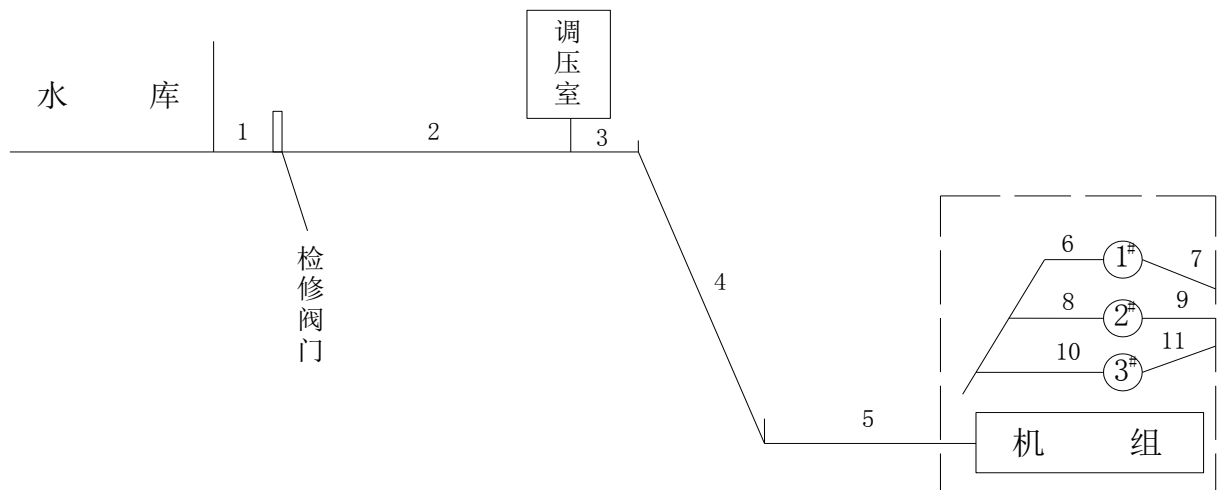


图 4-6 输水管路分段示意图

Fig 4-6 Schematic diagrams of classification of pipes

其中：1 段为水库至检修闸门前；2 段为检修闸门至调压室中心；3 段为主压力钢管上平段；4 段为主压力钢管竖井段；5 段为主压力钢管下平段。6 段、8 段、10 段分别为 1、2、3 号机组支管段加蜗壳段；7、9、11 段分别为各个机组的尾水管段。

基于特征线法的特点，每段管路又需要进行再分段。分段长度的确定需要依据经验来进行。前边已经提过，时间步长的选取需要满足 Courant 稳定条件，时间步长若不能与管道分段相匹配便会导致系统不稳定。理论上讲，分段越小，段数越多，计算点越多，计算结果越精确。然而分段太小会造成时间步长的缩小，过大的计算量对电脑配置要求太高，若达不到要求，便会影响计算速度，甚至可以导致计算机无法正常运行。以波速为  $1200\text{m/s}$  为例，倘若将  $100\text{m}$  的管路分段为 10 段，则每段  $10\text{m}$ ，计算步长则最大可为  $0.008\text{s}$ 。一般来说，在将管路分 10 段可以满足计算精度要求且计算机配置不高的情况下，则不应再缩减时间步长。

基于对计算速度和精度的各方面考虑，本文各分段参数如表 4-7 所示。从表中可以看出，分段长度最大为  $18\text{m}$ ，最小为  $14.2\text{m}$ ，基于特征线法计算稳定条件公式，取时间步长  $\Delta t = 0.011\text{s}$ 。

表4-7 当量管参数

Tabel 4-7 Parameters of equivalent pipes

标号	当量 面积 ( $\text{m}^2$ )	当量 管径 (m)	当量 长度 (m)	分段 数 $N_i$	波速 (m/s)	阻力系数 $f$			备 注
						最大 值	平均值	最小 值	
1	65	9.1	18	1	1250	0.0185	0.0144	0.0103	水库至检修闸门前
2	63.6	9	14835.9	825	1311	0.0191	0.0152	0.0108	检修闸门后至调压室中心
3	32.2	6.4	35	2	1106.4	0.0415	0.0399	0.0372	主压力钢管上平段
4	32.2	6.4	80.8	5	1284.5	0.0140	0.0122	0.0103	主压力钢管下弯段
5	32.2	6.4	42.6	3	1282.4	0.0262	0.0245	0.0226	主压力钢管下平段
6	10.17	3.61	53.6	3	1262.5	0.0181	0.0156	0.0137	1 号机组支管+蜗壳
7	8.69	3.32	17.49	1	1273.3	0.0174	0.0148	0.0124	1 号机组尾水管
8	10.17	3.61	53.6	3	1262.5	0.0181	0.0155	0.0132	2 号机组支管+蜗壳
9	8.69	3.32	17.49	1	1283.2	0.0171	0.0148	0.0124	2 号机组尾水管
10	10.17	3.61	53.6	3	1262.5	0.0180	0.0155	0.0130	3 号机组支管+蜗壳
11	8.69	3.32	17.49	1	1283.1	0.0172	0.0149	0.0126	3 号机组尾水管

## 4.3 工况的拟定及计算标准

### 4.3.1 工况的拟定及命名

#### 4.3.1.1 调压室极限涌浪水位的确定工况

对调压室极限涌浪水位的确定工况有 4 种，分别代号为 T1、T2、T3、T4。

工况 T1：上游取正常蓄水位，下游取正常尾水位，引水隧洞和压力钢管糙率分别取可能最小值和可能最大值，三台机组同时甩负荷。

工况 T2：上游取校核洪水位，下游取校核洪水位，引水隧洞和压力钢管糙率分别取最小和最大，三台机组同时甩全部负荷。

工况 T3：上游取死水位，下游取与流量对应尾水位，引水隧洞和压力钢管糙率分别取最大和最小，其中一台空载机组在另外两台机组满载运行的同时突增至 100% 负荷。

工况 T4: 上游取死水位, 下游取与流量对应尾水位, 引水隧洞和压力钢管糙率同取最小, 三台机组甩全部负荷。

根据调压室设计规范, 取 T1 和 T2 工况的最大浪涌为设计调压室最大浪涌值, 取 T3 和 T4 工况的最小浪涌值为设计调压室最小浪涌值。

#### 4.3.1.2 极限转速、极限压力的确定工况

对输水系统极限压力、及水轮机组极限转速的确定工况有 5 种, 分别代号为 H1、H2、H3、H4、H5。

工况 H1: 取额定水头, 以机组额定功率, 全部机组甩全负荷进行计算。

工况 H2: 取最大水头, 以机组最大功率, 全部机组甩全负荷进行计算。

工况 H3: 上游取正常蓄水位, 下游取最低尾水位, 全部机组额定出力同时甩全负荷。

工况 H4: 上游取校核洪水位, 下游取校核洪水位, 引水隧洞和压力钢管糙率均取最小, 三台机组同时甩全部负荷。

工况 H5: 上游取死水位, 下游取流量对应尾水位, 引水隧洞和压力钢管糙率同时取最大, 其中一台空载机组在另外两台机组满载运行的同时突增至 100% 负荷。

取工况 H1、H2 的蜗壳末端最大压力的较大者来确定蜗壳末端最大压力, 取转速上升最高者确定最大转速上升率。取工况 H3 确定尾水管最大真空度。取工况 H4 确定输水沿线最大压力。取工况 H5 确定输水沿线最低压力。

#### 4.3.1.3 小扰动调节品质确定工况

对调速系统调节品质的确定工况有 2 种, 分别代号为 S1、S2。

工况 S1: 上游正常蓄水位, 下游取流量对应尾水位, 下三台机组满负荷运行, 同时突甩 10% 负荷。

工况 S3: 上游正常蓄水位, 额定水头下三台机组接近空载运行, 同时突增 10% 负荷。

通过工况 S1 和 S3 对系统小波动过渡过程品质作出分析。

#### 4.3.2 计算标准

主要指标主要有转速上升率、蜗壳末端最大压力上升率、以及尾水管最大真空度、输水沿线最大和最小压力值。

控制转速上升主要是为了防止飞逸。事实上大部分机组可以承受飞逸转速, 但进入飞逸危机电站安全且有损机组, 故在运行中使机组意外进入飞逸状态仍属于电站事故。由于国内工程实际运行中将转速上升至较大范围均未出现问题, 故国内目前设计规范也将机组甩负荷时的最大转速上升率由 55% 调至 60%<sup>[48] [49]</sup>。然而基于对安全裕量的考虑, 本文仍旧使用老规范中 55% 的标准。

蜗壳末端最大压力上升率是调节保证计算的重要指标, 压力上升过大甚至可能引起压力钢管爆裂而造成事故。所以设计规范对机组甩全负荷时的蜗壳末端最大压力上升



率有着明确要求:

$H < 40\text{m}$	$\xi = 0.7 \sim 0.5$
$H = 40 \sim 100\text{m}$	$\xi = 0.5 \sim 0.3$
$H = 100 \sim 300\text{m}$	$\xi = 0.3 \sim 0.25$
$H > 300\text{m}$	$\xi < 0.25$

其中,  $H$  为净水头, 低水头时一般取大  $\xi$  值。

X 电最额定水头为 77.2m, 为属于 40 至 100 的范畴, 应取 50%, 即不超过 116.25m 水柱。但最大净水头为 102m, 属于 100 至 300 范畴, 应取 30%, 即不超过 132.6m 水柱。综上所述, 在基于安全裕量的考虑下, 本文计算标准取蜗壳末端最大压力为不超过 130m 水柱, 即  $H_{\max} \leq 130\text{m}$ 。

电站运行过程中, 尾水管总会存在真空度, 这是正常现象, 适度的真空度也有益于水轮机的动能回收。但尾水管真空度会随过渡过程的进行而变化, 当真空度过大时可能形成反水击以及水轮机进入水泵工况, 产生水泵升力, 并产生反向轴向力, 只要反向轴向力大于机组转动部分的总重量就会造成抬机, 导致严重事故。本文将 X 电站机组尾水管最大真空度计算标准定为 8m 水柱, 以免发生水柱分离, 造成抬机。输水沿线最大、最小压力值的确定是为了保证电站安全, 防止压力钢管爆裂和负压脱流等不良现象的产生。

所以本文采用计算标准为  $\beta < 55\%$ ,  $H_{\max} \leq 130\text{m}$ , 尾水管真空度不大于 8m 水柱, 输水沿线各点测压管水头不超过 130m 水柱且无负压脱流。

### 4.3 最优导叶关闭规律的确定

由于未能取得 X 电站具体的导叶关闭规律, 故在计算过渡过程之前需先确定最优导叶关闭规律。导叶的最优关闭规律通常是一条不规则的曲线。从理论上讲, 应当尽可能地使导叶实际关闭规律贴近这条不规则曲线, 才能使电站过渡过程达到最优调节品质。但每个工况的最优关闭规律都不一定相同, 而水电站在运行当中遇到的工况又非常多, 这令导叶关闭规律贴近最优曲线变得尤为棘手。其次, 目前曲线关闭规律和非固定模式关闭规律都尚未成熟, 且固定的线性关闭规律可以满足大部分水电站日常的生产需求, 故而如今大范围应用于实际的导叶关闭规律一般为直线关闭、分两段和分三段关闭规律。本文将分别通过对直线关闭、分两段关闭、分三段关闭规律的计算和对比来确定 X 电站的最优导叶关闭规律。

首先以 H1、H2、H3 三个对重要调保参数的控制工况来检测直线关闭规律。如表 4-8 所示。

表4-8 直线关闭规律计算结果

Tabel 4-8 The calculation results of linear closure law

<div> <div>关 闭 时 间</div> <div>参 数</div> <div>工 况</div> </div>	6s		7s		8s	
	$\beta$	$H_{\max}$	$\beta$	$H_{\max}$	$\beta$	$H_{\max}$
H1	50.32%	129.1m	52.50%	117.2m	55.02%	112.8m
H2	43.25%	144.1m	46.01%	130.5m	50.12%	129.4m
	尾水管最大真空度		尾水管最大真空度		尾水管最大真空度	
H3	-4.16m		-6.37m		-4.87m	

可以看到，直线关闭规律无法满足计算标准。虽然尾水管真空度均满足要求，但 H2 工况几乎没有可以满足的关闭时间。故而本文必要采用分段关闭规律进行 X 电站过渡过程改善。首先分析两段关闭规律,鉴于直线关闭之时蜗壳前最大压力通常发生在导叶完全关闭时刻附近，故而采用先快后慢的关闭方法，以降低最大压力上升值<sup>[8]</sup>并遏制转速上升。经过试算，关闭规律暂定为 2s 关闭 50%。具体结果见表 4-9。

表4-9 两段关闭规律计算结果

Tabel 4-9 The calculation results of two segments closing law

<div> <div>关 闭 时 间</div> <div>参 数</div> <div>工 况</div> </div>	6s		7s		8s	
	$\beta$	$H_{\max}$	$\beta$	$H_{\max}$	$\beta$	$H_{\max}$
H1	49.21%	115.2m	50.56%	108.3m	52.02%	107.2m
H2	43.15%	137.2m	44.62%	126.3m	45.13%	126.3m

表4-9 两段关闭规律计算结果（续）

Tabel 4-9 The calculation results of two segments closing law

	尾水管最大真空度	尾水管最大真空度	尾水管最大真空度
H3	-3.75m	-3.82,m	-3.75m

可以看到，分两段关闭规律效果较好，当关闭时间为 7s 时和 8s 时，满足计算要求。下面研究三段关闭规律。三段关闭规律的关键在于拐点的选择。第一段的设置目的在于不超过蜗壳末端最大压力值的同时尽快关闭导叶。第二段通常是为了缓和第一段快速关闭造成的水击压力，同时控制转速最大上升率。而第三段属于缓冲阶段，其目的在于导叶完全关闭后保证压强平稳，不产生剧烈波动。经过试算，关闭规律暂定为 0-1s 关闭 30%，1-3.5s 关闭 60%，表 4-10 为关闭时间不同时三段关闭规律的对比：

表4-10 三段关闭规律计算结果

Tabel 4-10 The calculation results of three segments closing law

工 况 参 数 关 闭 时 间	6s		7s		8s	
	$\beta$	$H_{\max}$	$\beta$	$H_{\max}$	$\beta$	$H_{\max}$
H1	49.08%	115.9m	49.40%	109.7m	49.61%	109.7m
H2	43.11%	136.4m	43.87%	124.9m	44.12%	124.9m
	尾水管最大真空度		尾水管最大真空度		尾水管最大真空度	
H3	-4.32m		-3.37m		-2.97m	

可以看出，三段关闭相较直线关闭和分两段关闭有明显优势，在 H1 工况时对转速上升有较大遏制作用，在 H2 工况中对压力上升也有明显控制作用。其中关闭时间取 8s 时，大波动过渡过程品质较好，故最优关闭规律为 1s（30%），3.5s（60%），8s（100%），如图 4-7 所示。

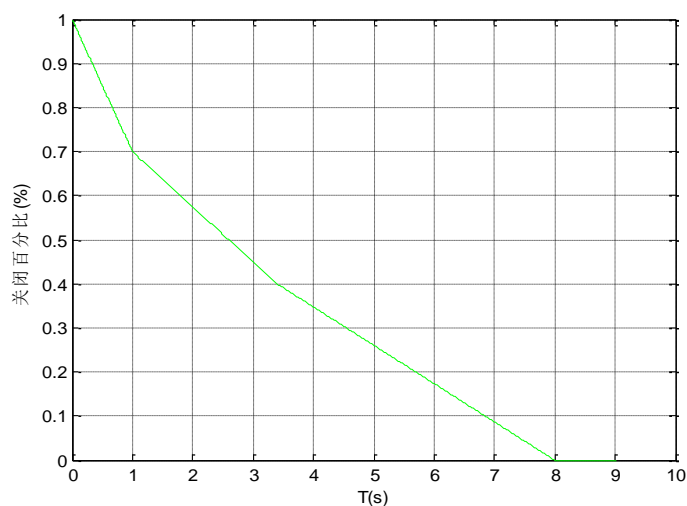


图 4-7 关闭规律示意图

Fig 4-7 Schematic diagrams of closing law

## 4.4 计算结果与分析

### 4.4.1 调压室极限涌浪水位工况的计算

对于 T1 和 T2 工况，设置计算时间为 1500s，以便在确定调压室最高浪涌的情况下观察波动的衰减度；对于 T3 和 T4 工况，只需要了解它们的第一和第二振幅，从而设置计算时间为 1200s。

T1、T2、T3、T4 工况的计算结果如图 4-8、4-9、4-10、4-11 所示：

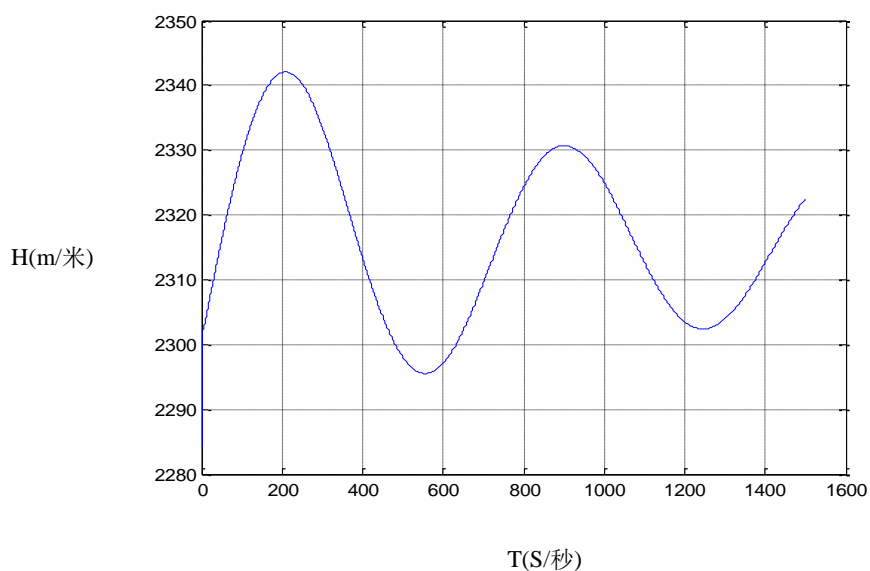


图 4-8 T1 工况下调压室水位波动

Fig 4-8 The water-level fluctuation in surge tank of T1 working condition

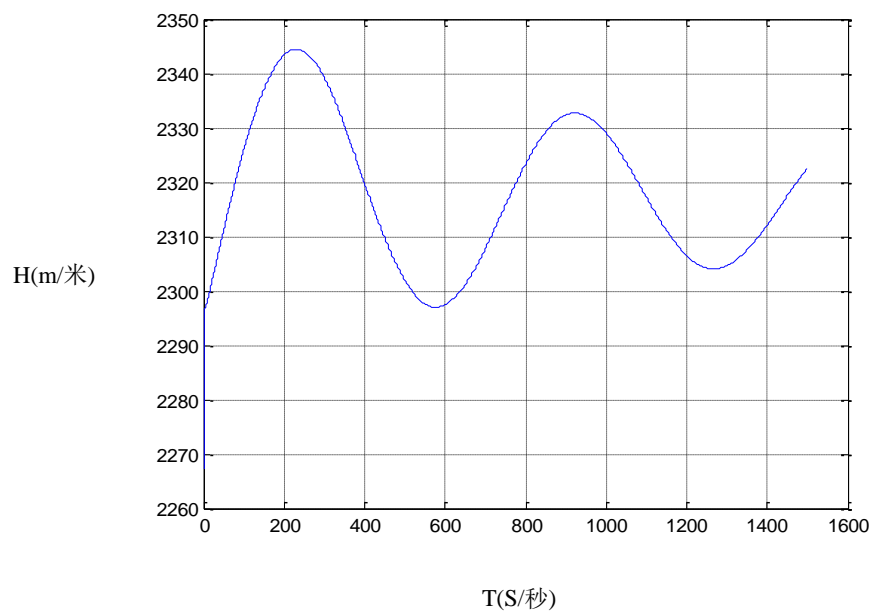


图 4-9 T2 工况下调压室水位波动

Fig 4-9 The water-level fluctuation in surge tank of T2 working condition

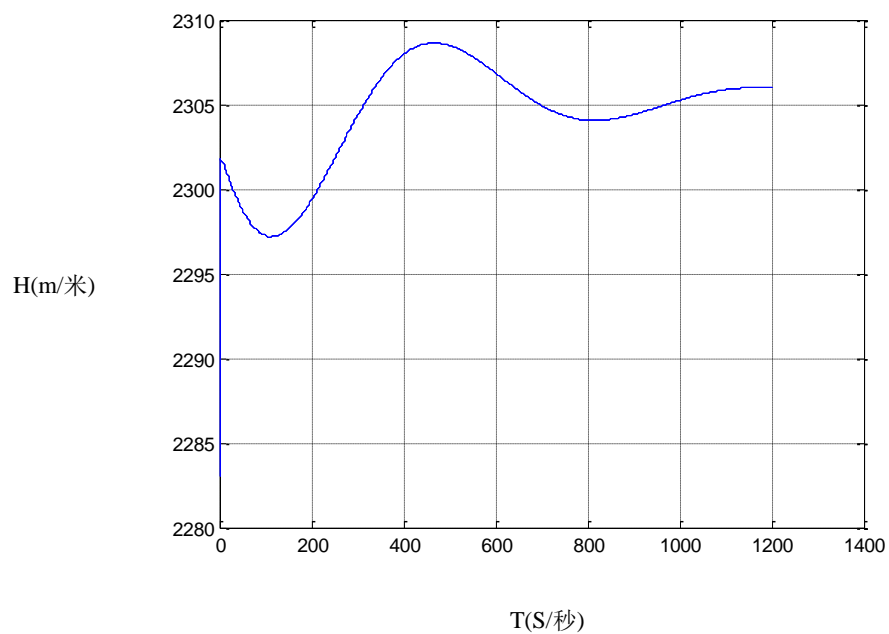


图 4-10 T3 工况下调压室水位波动

Fig 4-10 The water-level fluctuation in surge tank of T3 working condition

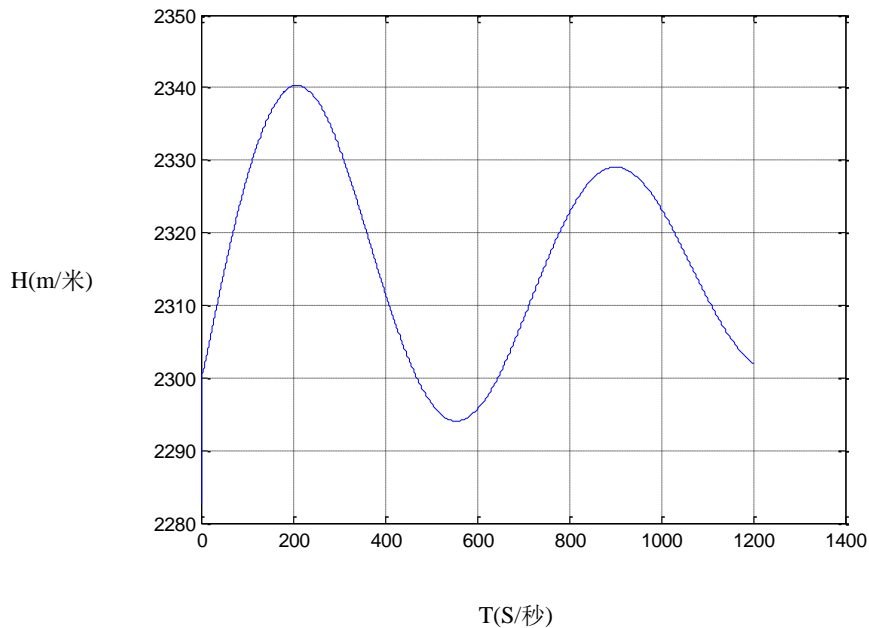


图 4-11 T4 工况下调压室水位波动

Fig 4-11 The water-level fluctuation in surge tank of T4 working condition

T1 工况中，调压室水位最高水位值为 2341.4m，出现在 207s；调压室最低水位值为 2296.5m，出现在 559s，图形衰减度较好。

T2 工况中，调压室最高水位为 2342.4m，出现在 236s；调压室最低水位为 2297.2m，出现在 0s，波形衰减度较好。

T3 工况中，调压室最高水位为 2308.7m，出现在 462s；调压室最低水位为 2297.4m，出现在 110s。

T4 工况中，调压室最高水位为 2340.0m，出现在 208s，调压室最低水位为 2292.2m，发生在 537.4s。

所以，根据调压室极限水位控制工况的计算，调压室最高浪涌为 2342.4m，出现在 T2 工况的 236s；调压室最低浪涌为 2292.2m，出现在 T4 工况的 537.4s。总体波形衰减度较好，调压室趋于稳定。

调压室地板高程 2281m，离最低水位 2292.2m 有足够的安全裕量，调压室顶部高程 2347m 对最高浪涌 2342.4m 有 4.6m 的安裕量，满足要求。

#### 4.4.2 极限转速、极限压力确定工况的计算

##### 4.4.2.1 蜗壳末端最大压力、转速最大上升的计算

由于导叶关闭时间为 8s，且水击波衰减较快，根据经验设置计算时间为 20s。工况 H1 计算结果如图 4-12、4-13、4-14、4-15 所示：

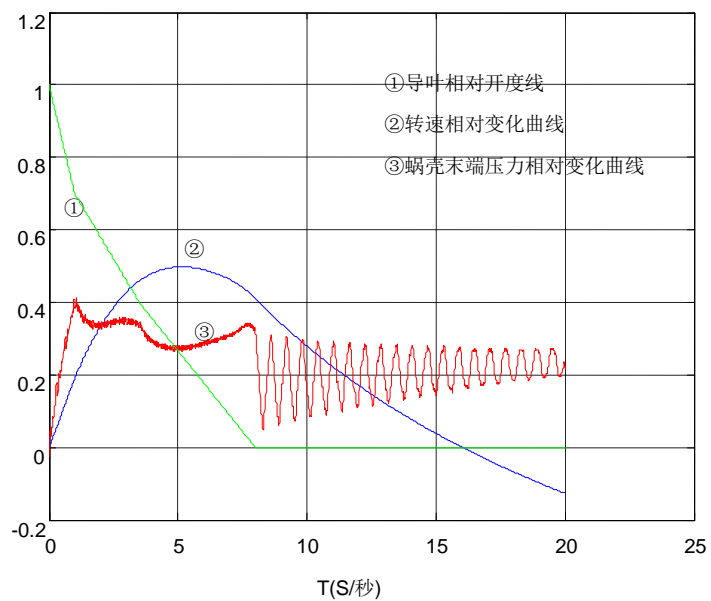


图 4-12 H1 工况计算结果

Fig 4-11 The calculation results in H1 working condition

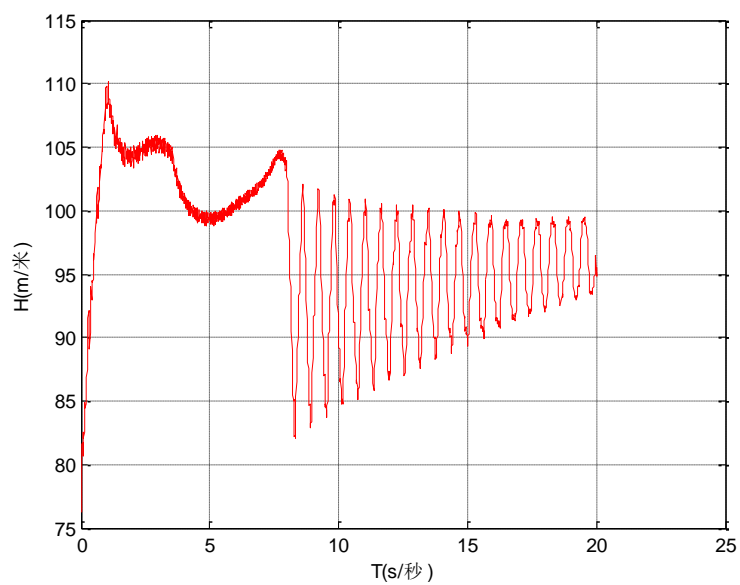


图 4-12 H1 工况蜗壳末端实际压力上升曲线

Fig 4-12 The rising curve of H1 working condition in the end of volute

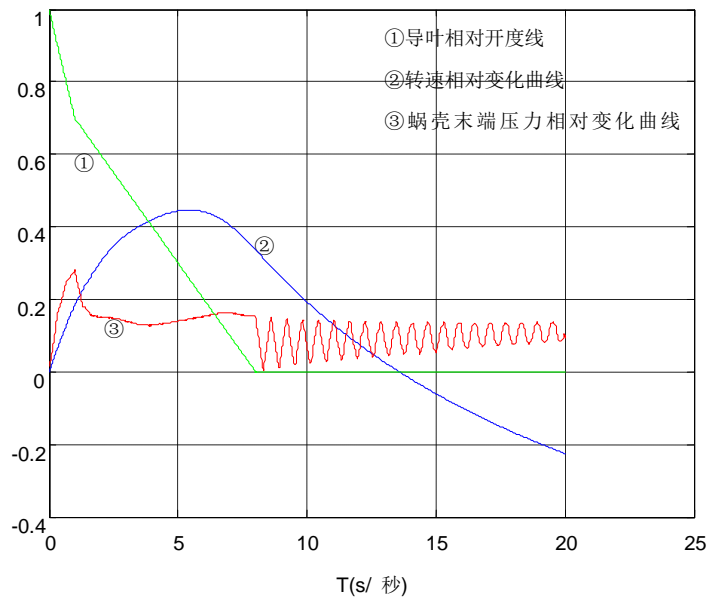


图 4-13 H2 工况计算结果

Fig 4-13 The calculation results in H2 working condition

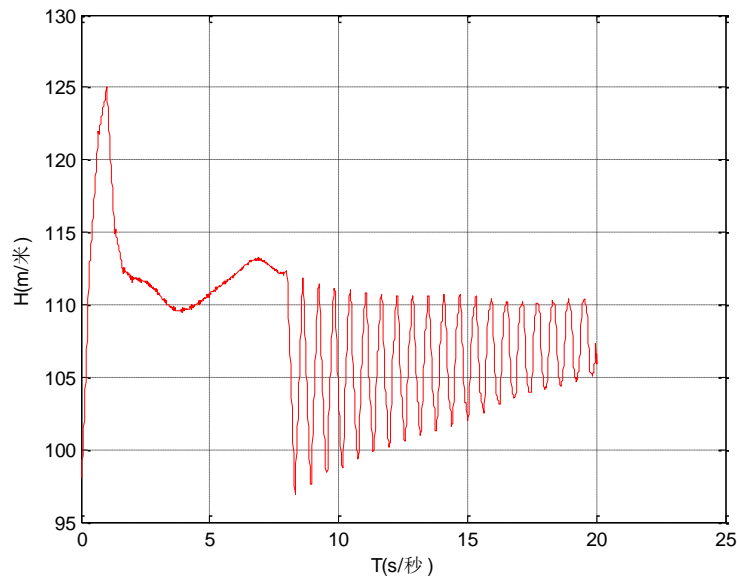


图 4-14 H2 工况蜗壳末端实际压力上升曲线

Fig 4-14 The rising curve of H2 working condition in the end of volute

可以看出，最大转速上升率发生在工况 H1 的第 5.3s， $\beta = 49.61\%$ ；最大蜗壳末端动水压强发生在工况 H2 的第 1.76s，最大压力上升为  $H_{\max}$  为 124.9m 水柱。故而满足计算标准中  $\beta \leq 55\%$ ， $H_{\max} \leq 130m$  的要求。从曲线上看，导叶关闭规律较为合理，第一段 1s 内快速关闭 30%，在遏制转速上升的同时蜗壳末端压力负荷要求；第二段稍微放缓，在 3.5s 关闭了 60%时，在缓解了水击压力的同时控制了最大转速上升率；第三段缓冲阶



段效果较好，使关闭时蜗壳末端压力值未超过第一段关闭末尾时的压力值，且关闭后压力波动幅度正常，衰减迅速。

#### 4.4.2.2 尾水管最大真空度的计算

尾水管最大真空度应当利用工况 H3 来计算，计算时间 20s，具体计算结果如图 4-15：

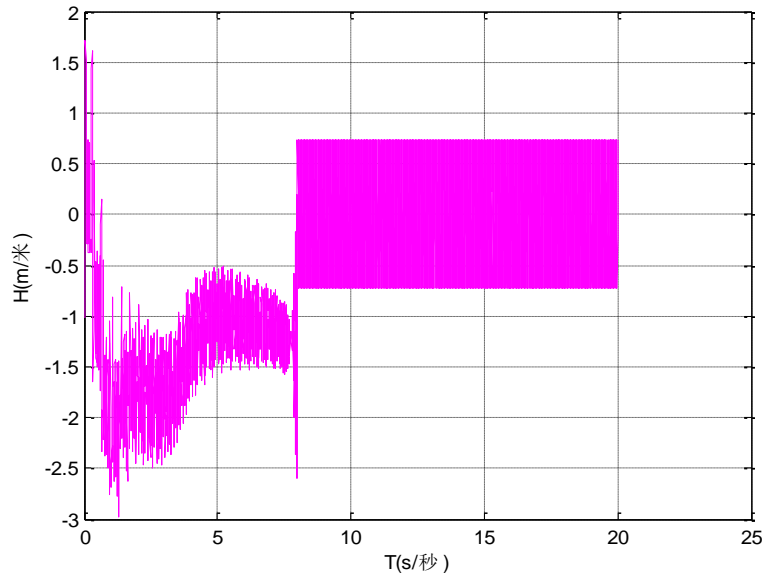


图 4-15 H3 工况尾水管进口压力上升曲线

Fig 4-15 The changing curve of H3 working condition in the draft tube

尾水管最大真空为 2.97m 水柱，发生在 1.8s。离计算标准不大于 8m 水柱有充分的安全裕量，导叶完全关闭之后有正常压强波动，整体过渡过程平稳。

#### 4.4.2.3 输水沿线最大、最小测压管水头值的计算

X 电站引水隧洞全长 14853.9m，由于引水隧洞测压管水头不会有太大波动，故将每段长度设置为 2475.65m，分为 6 段。压力钢管全长为 208m，分为 4 段，每段长 52m。命名输水沿线 8 个点分别为 A、B、C、D、E、F、G、H，如图 4-16 所示。

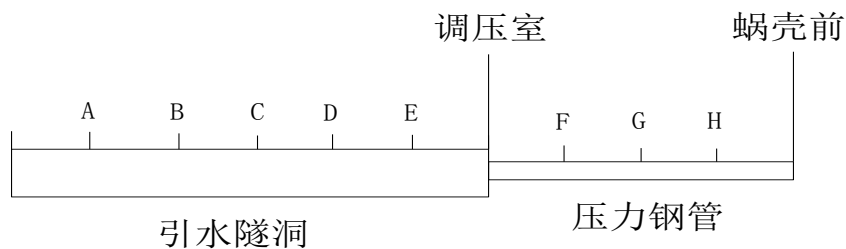


图 4-16 测压管水头计算节点示意图

Fig 4-16 Schematic diagrams piezometric head calculation points

将电站最低尾水位 2207m 定义为基准面，根据特征线法，以工况 H4 和 H5 为控制工况，输水沿线测压管最大、最小水头计算结果如表 4-11。

表4-11 管道测压管水头各节点计算结果

Tabel 4-11 The calculation results of piezometric head of the points in pipes

节点 参数	A	B	C	D	E	F	G	H
最大测压管水头 (m)	110.13	111.55	112.01	113.03	114.11	114.73	119.40	123.91
最小测压管水头 (m)	99.78	97.32	92.12	86.31	79.22	76.72	75.43	73.21

从上表得知，水击波对压力钢管的测压管水头线有着明显影响，影响自压力钢管下游至调压室逐渐降低，均为出现超过 130m 水柱的情况，也未出现负压脱流。可以看到，调压室对 E 点及 F 点有显著的调节作用影响，但向厂房靠近调节影响逐渐减弱。总体上看，测压管水头分布较为合理。

#### 4.4.3 关于小波动过渡过程调节品质的计算

本文选取的 PID 型调速器的方块图如图 4-17：

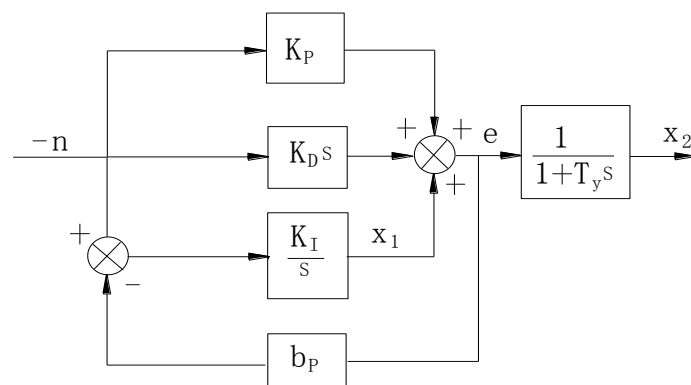


图 4-17 PID 调速器方块图

Fig 4-17 Block diagram of PID governor

选取如图 4-17 所示积分环节和一阶惯性环节的输出作为状态变量，可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -K_I n - b_p e \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T_y} x_2 + \frac{1}{T_y} e \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

$$e = x_1 - K_p n - K_D \dot{n} \quad (4-3)$$

将式 (4-2)、(4-3) 联立, 消去  $e$  得

$$\dot{x}_1 = -K_I n - b_p (x_1 - K_p n - K_D \dot{n}) \quad (4-4)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{T_y} x_2 + \frac{1}{T_y} (x_1 - K_p n - K_D \dot{n}) \quad (4-5)$$

经整理得系统的状态方程

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -b_p & 0 \\ 1/T_y & -1/T_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} b_p K_p - K_I & b_p K_D \\ -K_p/T_y & -K_D/T_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ \dot{n} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-6)$$

斯坦因对 PID 型调速器参数整定的建议有:

$T_n = 0.5T_w$ ,  $b_p + b_i = 1.5T_w/T_a$ ,  $T_d = 3T_w$ ,  $K_p = (T_d + T_n)/(b_i T_d)$ ,  $K_I = 1/(b_i T_d)$ ,  $K_D = T_n/b_i$ , 故初选调速器整定参数  $K_p = 5.0$ ,  $K_I = 1.5$ ,  $K_D = 2.5$ 。根据工况 S1、S2 进行计算, 以横轴为时间轴, 纵轴为转速相对值, 作图 4-18、4-19, 并绘制表 4-12。

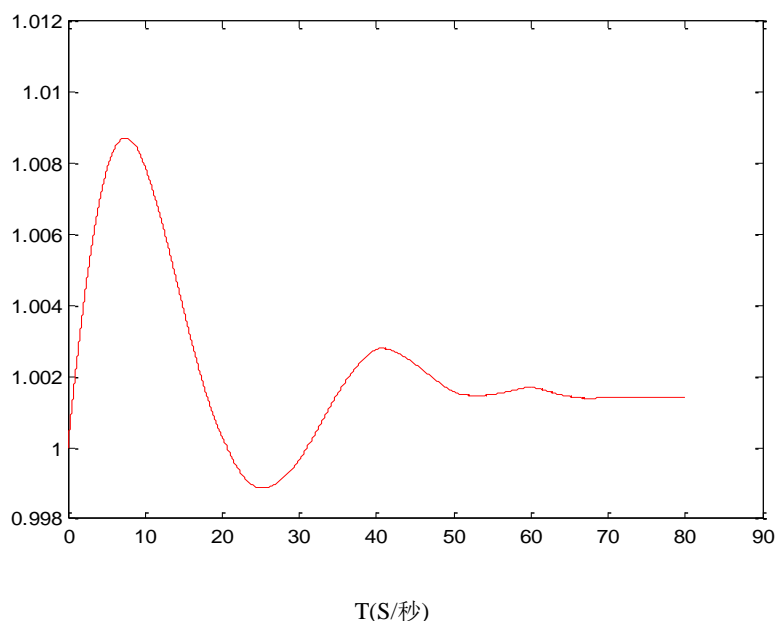


图 4-18 S1 工况计算结果

Fig 4-18 The Calculation results of S1 working condition

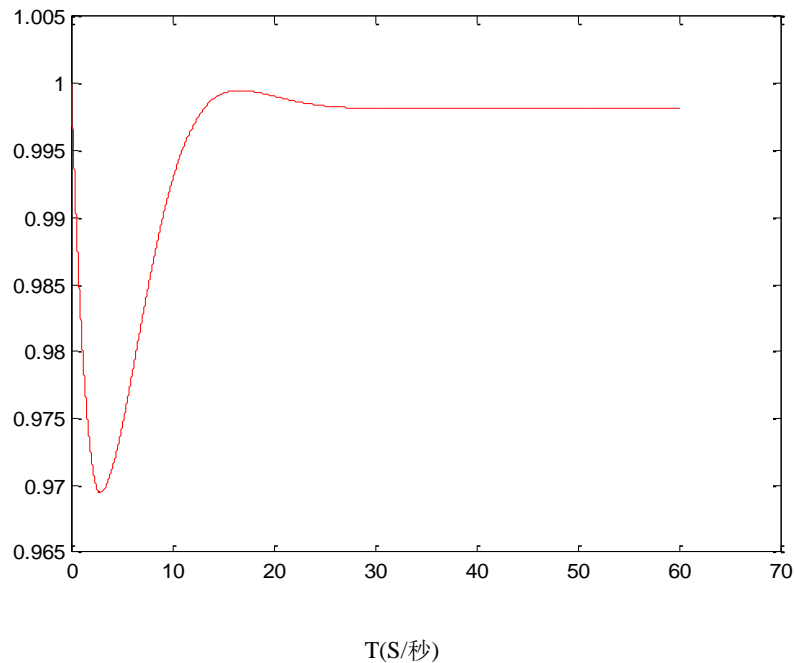


图 4-19 S2 工况计算结果

Fig 4-19 The Calculation results of S2 working condition

表4-12 小波动过渡过程计算结果

Tabel 4-12 The calculation results of small perturbation

工 况 \ 参 数	调节时间（秒）	最大偏差（转）	衰 减 度 （百分比）
S1	53.1	1.46	62.55
S2	25.6	-5.10	97.81

X 电站并未担任调频任务，且机组出力占整个电力系统容重不大。且在设立调压室后， $T_w / T_a$  远小于 0.4，故波动恒是衰减的。根据相关设计规范（文献[48]）的规定，无需进行调压室稳定性分析。

与此同时，从图形和数据可以看出，虽然工况 S1 调节时间较长，但最大偏差较小，为 1.46。且波形衰减度较好，37s 后，转速波动趋于平稳，转速偏差保持在千分之二左右，不会对电能生产造成大的影响。工况 S2 波形衰减迅速，在 25s 后转速趋于平稳。总体来看，小波动过渡过程调节品质较好。

## 4.5 关于 X 电站的若干条优化建议

通过上述计算，发现 X 电站整体布置合理性良好，大小波动过渡过程品质均能满足

相应指标,但还有很大的可优化空间。遗憾的是 X 电站已经落成并投入生产。排除可实施性因素的制约,下面论述几点优化建议,并加以简单论证。

#### 4.5.1 水轮机选型设计的优化

虽然 HL160 在中、小型水轮机机型谱上适用水头为 45~120m,涵盖了 X 电站的最大和最小水头,但仍不完全适合。由于其比速较低、最优工况对应的单位转速和单位流量较小,所以在出力一定时,其相应的转速较低、要求转轮直径相对较大,同时与其匹配的机组  $GD^2$  也较大。因此,若选择比速 200 以上,且适用本电站水头的混流式转轮,则至少可缩减转轮直径 0.5m,缩减机组  $GD^2$  至  $2000t \cdot m^2$  以下。显然,这能在保证出力的情况下节约不少成本。

#### 4.5.2 机组飞轮力矩的优化

虽然 X 电站过渡过程各项指标都达到了相应要求,但大波动过渡过程计算的各项参数在各控制工况也都逼近临界值,故有优化的必要。机组飞轮力矩即机组  $GD^2$ 。通过在机电设计手册(文献[52])中查图表得知, X 电站机组  $GD^2$  应该在  $4000t \cdot m^2$  左右。然而实际机组  $GD^2$  只有  $3000t \cdot m^2$ ,相差甚远。故而可以考虑在不变动水轮机组型号的前提下,对机组  $GD^2$  作出优化,进而改善大波动过渡过程各项指标。暂定机组  $GD^2$  为  $3600t \cdot m^2$  进行计算,具体对比结果如下表所示。

表4-13优化前后对比

Tabel 4-13 The comparison of before and after optimization

工 况 参 数 $GD^2$	H1		H2		H3
	$\beta(\%)$	$H_{\max}(\text{m})$	$\beta(\%)$	$H_{\max}(\text{m})$	尾水管真空(m)
$3000t \cdot m^2$	49.61	109.7	44.12	124.9	-2.97
$3600t \cdot m^2$	42.35	104.2	39.18	117.8	-2.76

通过对比可以发现,优化方案可以很好地改善大波动过渡过程的品质。尾水管真空度、蜗壳末端最大压力和机组最大上升速率都有了很好的改善。

#### 4.5.3 调压室的优化

虽然 Thoma 公式表明水头低、引水管道长的电站容易出现调压室不稳定,但其是

基于水电站孤立运行的假设。由于现在电站大都并网运行，且 X 电站所占系统比重不大，故而  $570m^2$  的调压室断面面积略大，显得不太经济。

对于阻抗孔口，应该占引水隧洞断面面积的 15%-50%，增大阻抗孔口虽然可以改善水击压力，但超过 50% 时又有违选用阻抗式调压室的初衷。X 电站阻抗孔口直径设置较为合理，故而不加变动。

现暂定调压室断面面积为  $450m^2$  进行计算，计算结果如表 4-14。

表4-14 优化前后对比  
Tabel 4-14 The comparison of before and after optimization

工 况 水 位 面 积	T1	T2	T3	T4
	最高水位 (m)	最高水位 (m)	最低水位 (m)	最低水位 (m)
$570m^2$	2341.4	2342.4	2297.4	2292.2
$450m^2$	2342.2	2343.8	2297.1	2291.1

可以看到，通过对压室断面面积的调整，调压室内极限涌浪水位并无明显变化，距离调压室底板高程 2281m 和顶部高程 2347m 都有充分的安全裕量。

#### 4.5.4 对于电站优化的同种工况验证计算

虽然上述优化都取得了良好的效果，但调压室涌浪、蜗壳末端压力上升、转速上升、尾水管真空度等几项重要指标都是分别通过其控制工况进行计算的，而非在同一种工况下。虽然这样计算在理论上较为合理，但由于调压室涌波和水击作用的互相影响，对电站调压室的优化将影响机组转速和蜗壳末端压力，而对机组  $GD^2$  的修改也可影响调压室涌波。故本文将使用较为典型的 H2 工况对 4.5.2 和 4.5.3 小节所述的调压室和机组  $GD^2$  的优化进行各项参数的同种工况验证计算，作为优化措施的可实施性校核。

由于重新规定了机组  $GD^2$  和调压室断面面积，所以应该重新选择导叶关闭规律。通过反复试算，确定导叶关闭规律为：

第一段：0-1s 关闭百分之 22%；

第二段：1-3.5s 关闭 55%；

第三段：3.5-8s 关闭 100%。

先进行调压室浪涌的计算，计算结果如图 4-20：

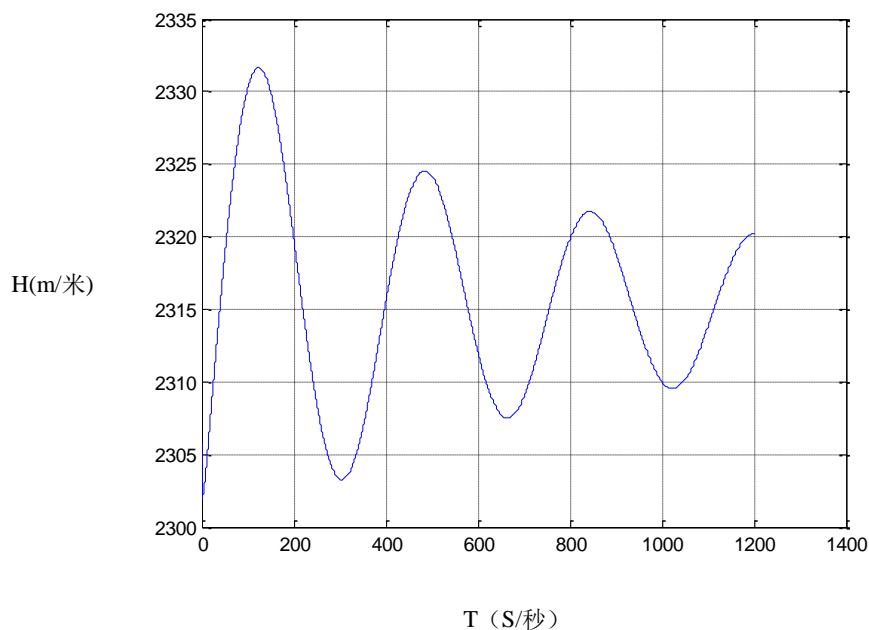


图 4-20 H2 工况下调压室水位波动

Fig 4-20 The water-level fluctuation in surge tank of H2 working condition

可以从图中看出，1200s 内除了震荡频率相较于优化前增加之外，衰减速率并无太大影响，调压室涌波逐渐趋于稳定。

对于转速上升和蜗壳末端压力计算结果如图 4-21、4-22：

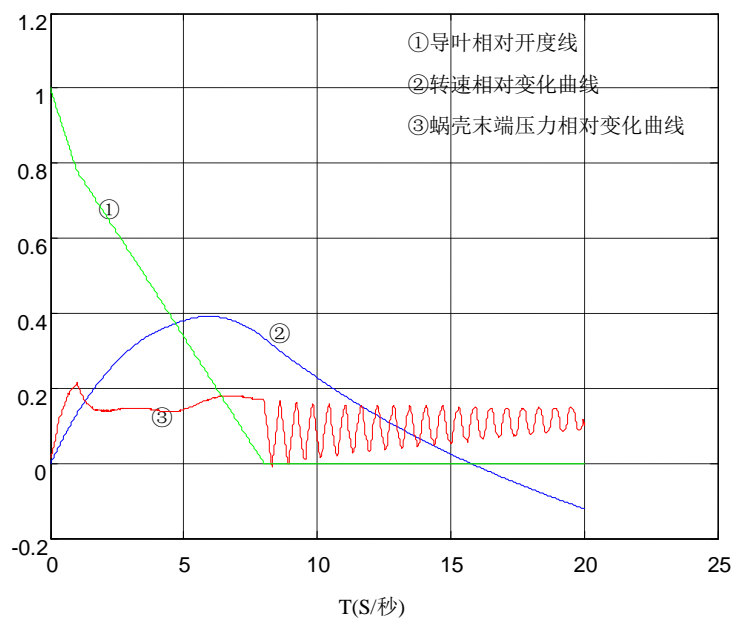


图 4-21 H2 工况计算结果

F ig 4-21 The Calculation results of H2 working condition

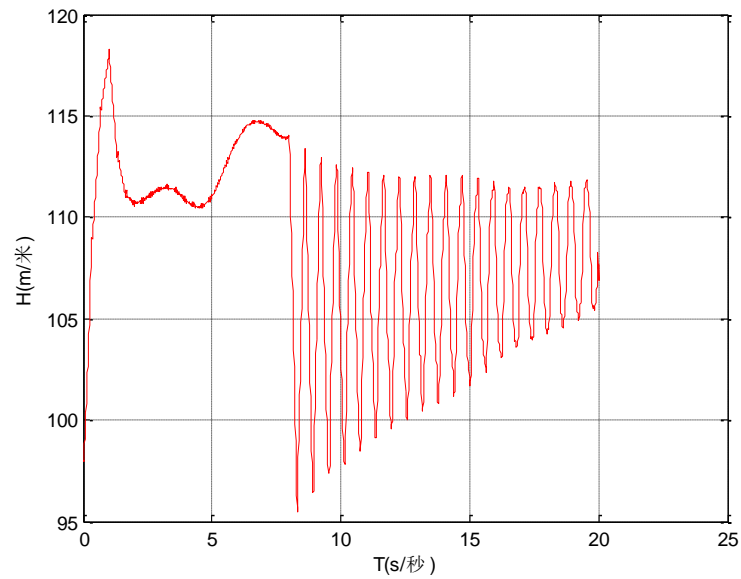


图 4-22 H2 工况蜗壳末端压力上升曲线

Fig 4-22 The rising curve of H2 working condition in the end of volute

可以看出，转速最大上升率发生在 3.4s，最大值为 39.18%；蜗壳末端最大上升率发生在 1.76s，为 117.8m 水柱，大波动过渡过程品质优化效果明显。

对尾水管最大真空的计算如图 4-23：

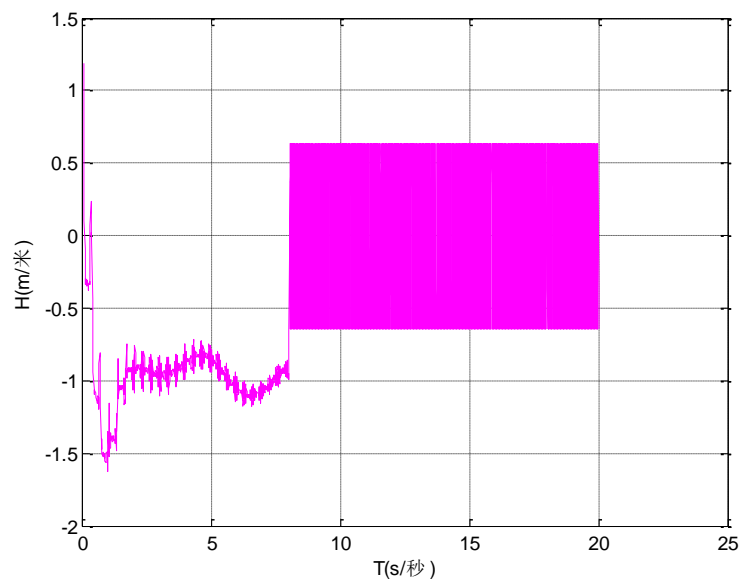


图 4-23 H3 工况尾水管进口压力变化压力上升曲线

Fig 4-23 The changing curve of H3 working condition in the draft tube

从图 4-15 可以看出，在 H2 工况下，到尾水管最大真空发生在 1.76s，最大真空为 1.63m 水柱，符合标准，未见异常。通过上述验证计算，本文对 X 电站优化结论如下：



1.通过调整调压室断面面积的手段来减少投资的方案在验证计算中未对重要调保参数产生影响，且调压室极限涌浪水位变化幅度很小。

2.通过增加机组  $GD^2$  来改善过渡过程的优化方案在验证计算中对大波动过渡过程改善效果显著。

综上所述，优化方案切实可行。



## 5 研究成果与展望

本文研究成果如下：

本文在绪论部分阐述了过渡过程研究的实用价值，以及国内外大小波动过渡过程研究发展的历程，总结了目前研究过渡过程所存在的问题、如今研究过渡过程的最新动向，并给出了一定的看法。

本文利用第二章较为详细地推导了特征线法的基本方程：运动方程和连续性方程。并详细地介绍了特征线法计算水击的原理、边界条件的建立，以及如何具体地将蜗壳和尾水管当量化、选取时间步长。第三章给出了过渡过程计算所必要的数学模型，并详细介绍了过渡过程计算的原理和步骤。另外，第三章简单地介绍了 **MATLAB** 在过渡过程中的优势与应用，并介绍了过渡过程电算的原理。

在第四章的工程实例中，本文作者根据亲身体会，论述了获取原始数据的技巧与经验。第四章针对性较强地拟定了 11 种工况，其中大波动 9 种，小波动 2 中。通过反复试算出了合理的调速器参数和导叶关闭规律。然后利用特征线法，在考虑水击波和调压室涌波互相作用的前提下对位于四川的 X 电站进行大小波动过渡过程计算，提供了大量且详尽的对比数据，利用 **MATLAB** 绘制了详细的过渡过程历程曲线。最后，提出了对 X 电站的一些优化建议，并对建议的合理性进行了验证。

然而，由于作者水平有限，本文难免存在不足之处：

首先，本文粗略地将局部水头损失以均摊的方式加入到沿程水头损失中去，这种方法虽然简化了计算，但在输水沿线的测压管水头的计算中可能导致轻微失真。其次，本文采用了手绘的方式获取全特性曲线，难免存在人为误差。再次，由于时间仓促，本文对小波动过渡过程的分析和计算稍显粗略。

对于未来过渡过程计算的发展，笔者有如下看法：

首先，导叶关闭规律的优化作为最经济、最有效的调保手段，其在今后研究中依然不会降温。目前线性的分段关闭手段肯定不能达到最优效果，随着计算机技术和调速技术日益发达，在甩负荷时采用程序智能控制导叶进行曲线关闭、非固定模式关闭将会成为研究热点，依据不同工况选择最优导叶曲线关闭规律将会运用在实际工程当中。

其次，目前主流的电算方法有其粗略之处，例如特征线法。将流体视为一元流是其最大弊端，流体由于多元流动造成的不稳定因素完全被忽略。与此同时，将视为一元流意味着必须要将复杂形状的管道当量化，而管道的当量化难免造成计算的失真。综上所述，一元流计算的精度很难大量提高，将来对过渡过程精准的计算还要依赖有待成熟的二维、三维的水击计算方法。



## 攻读学位期间参加的科研项目及发表的学术论文

参加项目情况：

发表论文情况：

1. 王洋, 王玲花.水电站过渡过程研究历史及现状综述[J].吉林水利, 2014,9: 29-33.



## 致 谢

首先感谢我的导师，王玲花教授。王老师在我三年的研究生学习和生活中，给予了我莫大的帮助、鼓励与指导。在学习上，王老师要求严格，从不纵容学生；却又耐心指导，从不放弃学生，她严厉的批评和孜孜不倦的教诲使我毕生难忘。在生活上，王老师亦师亦友，经常与学生谈心，帮助学生解决心理问题；同时关注学生吃穿冷暖，为学生解决生活问题。她无微不至的关怀和慈祥的微笑使我倍感温暖。自研一开始，王老师就着手为我考虑论文方向，并劝我多听与论文相关的课程，同时帮忙提供了一些论文方面的重要资料和书籍。在论文写作期间，王老师总是孜孜不倦地解答我每一个疑问。最终定稿之前，王老师又指出了我许多谬误之处，提供了很多宝贵意见。在此希望王老师珍重身体，祝她工作顺利，万事如意。

在论文的写作遇到瓶颈之时，孙美凤教授也为我解答了不少疑惑，给过我许多宝贵的建议，这都令我备受裨益。在此祝愿她身体健康，家庭美满，工作顺利。论文的完成与王佳师兄的指导和帮助也分不开。每逢疑问，王佳师兄总会放下手头的工作为我解答，令我感激不尽。干超师兄、殷晶师兄和宁盼华师姐也时常为我答疑解惑，提供资料。感谢师兄师姐的帮助，祝他们前程似锦。

感谢曾经教育过我的陈德新老师、高传昌老师、楚清河老师、刘新阳老师，感谢他们对我的教诲，祝他们身体健康，阖家幸福。

特别地，感谢英年早逝、至今令我缅怀的赵万里老师，愿他在九泉之下得以安息。

感谢同窗李泰堃、范子龙，以及师弟张杨、张鹏、胡李杰、乔文涛、黄鑫、王坤，师妹冯小燕的帮助，愿他们学业有成、工作顺利。感谢室友赵臣鹏、赵地、吴志超在生活上、学习上给我的帮助，令我难忘三年室友情。感谢 2010-2014 级的所有研究生，愿他们万事如意。

三年的光阴恍若弹指一挥间，求学生涯自此告一段落，而步入社会的号角刚刚吹响。用三年的时间建立的师生、同学情谊还未在手中捂热，便就要各奔东西。人生总是这样，相聚又分离。带着感激，我将以饱满热忱的态度投入中国水电事业。

姓 名：王 洋

2015 年 4 月 1 日





## 参考文献

- [1] 郭应杰. 水力资源开发程度的合理性研究[J]. 河南水利与南水北调, 2013, (5): 59-60.
- [2] 郑源, 张健主编. 水力机组过渡过程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.
- [3] 丁浩. 水电站有压引水系统非恒定流[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1984.
- [4] (俄) Г. И. 克里夫琴科著, 常兆堂、周文通、吴培豪译, 水电站动力装置中的过渡过程[M]. 北京: 中国水力水电出版社.
- [5] Calame J and Gaden D. Theories des chaudières quilibre[M]. Paris, 1926.
- [6] [19] Brown F T. The Transient Response of Fluid Lines[J]. Journal of Basic Engineering. ASCE, 1962, 88(12): 546-553.
- [7] 董兴林. 水电站调压井稳定断面的研究[J]. 水力学报. 1980, 11 (8): 28-30.
- [8] 杨开林, 董兴林. 水电站长输水管道管流气泡动力特性研究[J]. 水力学报, 1998, 29 (11): 6-16.
- [9] 周建旭, 索丽生. 小波动稳定性分析中的零特征值研究[J]. 水力学报, 2000, (8): 53-56.
- [10] 焦云乔, 江春波等. 长引水隧洞水电站小波动过渡过程影响因素研究[J], 水力发电学报, 2009, 28 (3): 157-163.
- [11] 程永光, 张师华, 陈鉴治等. Lattice-Boltzmann 方法应用实例—水电站水击计算[J]. 武汉水利水电大学学报, 1998, 31 (5): 22-25.
- [12] 李树慧, 蔡怀森. 浅析水击理论的发展及现状[J]. 科技信息, 2010 (3): 422-423.
- [13] 杨玲霞, 李树慧, 侯咏梅等. 水击基本方程的改进[J]. 水力学报, 2007, 38 (8): 948-952.
- [14] 王明峰. 海甸峡水电站调压室稳定断面选定及其涌波计算[J]. 水利规划与设计, 2011, 3: 44-46.
- [15] 刘文斌, 游秋森, 钟全胜等. 不对称引水系统双调压井稳定断面研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32 (6): 172-176.
- [16] 邵宜详, 蔡晓峰, 蔡卫江等. 中国水轮机调速器行业技术发展综述[J]. 水电站自动化与大坝检测, 2009, 33 (6): 13-16.
- [17] Ye Luqing, Wei Shouping, Li Zhaohui, et al. An Intelligent Self-improving Strategy and its microprocessor based. Implementation to a Hydro-turbine Governing System[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 1990(4): 82-86.
- [18] 诸静. 模糊控制原理及运用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [19] 周继成. 人工神经网络[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [20] 方庆红, 孙美凤, 沈祖诒. 水轮机调节系统控制策略综述[J]. 人民长江, 2004, 35 (1): 33-35.

- [21]樊红刚,崔赫辰,陈乃祥.导叶关闭规律非线性评价函数及多工况优化[J].排灌机械工程学报, 2013, 31 (3): 230-235.
- [22]王煜,田斌.水轮机导叶适时关闭规律初探[J].湖北水力发电, 2006,4:73-74.
- [23]王煜,田斌.遗传算法在水轮机非固定模式导叶关闭规律中的应用[J].大机电技术, 2009,4: 42-47.
- [24]IEC-61362, 水轮机控制系统规范导则[S].
- [25]DL/T563-95, 水轮机电液调节系统及装置技术规程[S].
- [26]王丹,杨建东,高志芹.导叶开启时间对水电站过渡过程的影响[J].水力学报, 2005,26 (1): 120-124.
- [27]杨建东.导叶关闭规律的优化及对水力过渡过程的影响[J],水力发电学报, 1999(2): 75-83.
- [28]穆祥鹏,陈继建,刘瀚和. 复杂输水系统水力过渡的数值方法比较及适用性分析[J].天津大学学报, 2008,41 (5): 515—521.
- [29]索丽生.国外有压瞬变流研究进展[J].河海科技进展, 1991,11 (2): 9-15.
- [30]于必录.含气水锤的研究现状及其进展[J].流体工程, 1992,20 (5): 40-46.
- [31](日)秋元德三.水击与压力脉动[M]. 北京: 电力工业出版社, 1991.
- [32]ZHOU Ze-xuan, TAN SOON Keat. Theoretical, numerical and experimental study of water hammer in pipe system with column surge chamber[J].Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2004,16 (1): 52-56
- [33]Wylie E B. Simulation of Vaporous and Gaseous Cavitation[J]. Fluids Engrg, ASME, 106(3), March, 1984, 297~311.
- [34]Yong T. Hydraulics Investigation. Subservient to an Intended Croonian Lecture on the Motion of Blood. Phliosophical Transaction of the Royal Society. 1808, 2~13.
- [35]Calame J and Gaden D. Theoriedes chambrese quilbre[M]. Paris, 1926. [18] Brown F T. The Transient Response of Fluid Lines[J]. Journal of Basic Engineering. ASCE, 1962, 88(12):546~553.
- [36]Andersin A. Menabrea' s Note on water Hammer[J]. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 1976, 102(3):29~39.
- [37]杨建东,杨桀彬.混流式水轮机特性曲线的边界条件的研究[C]. 第二届水力发电技术国际会议论文集: 445-450.
- [38]Wylie E B, Streeter V L and Suo S. Fluid Transients in systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 1993, 119(9):1~20.
- [39]Frank J and Schuller J. Schwingungen in den Znleitungs-uud Ableitungsksnalen Von Wasserkraftanlagen[M], Springer, Berlin, 1938.
- [40] Brunone B, Golia U M and Greco M. Some Remarks on the Momentum Equation

- for Fast Transients[C]. International Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation. 9th Table, IAHR. Valencia, Spain, 1991, 140~148.
- [41]Cunningham W J. Introduction to Nonlinear Analysis[M]. Mc Graw Hill Book Company, Inc. New York, 1958.
- [42]Svingen B and Kjeldsen M. Fluid structure Interacion in Piping Systems, Proceedings of the International Conference on Finite Element in Fluids-New Trends and applications[M]. Venice, Italy. October 1995, 955~963.
- [43]Ruus E. Stability of Oscillation in Simple Surge Tank[J]. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 1969, 95(10):1577~1587.
- [44]Streeter V L and Lai C. Water Hammer Analysis Including Fluid Friction[J]. Hyd.Div. ASCE, Vol. No.88, HY3, May, 1962, 79~112.
- [45] Wylie E B and Streeter V L. Fluid Transients[M]. McGraw-Hill International Book Company, 1978.
- [46]王慧莉. 导叶两段关闭规律研究[J]. 甘肃水利水电技术, 1997, 3:37-39.
- [47]Stein T. Frequency Control under Isolated Network Conditions[J], Water Power, 1970.
- [48]中华人民共和国电力行业标准. DL/T5186-2004水力发电厂设计规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [49]水利电力部成都勘测设计院. SDJ173-85水力发电厂机电设计技术规范[M]. 北京: 北京市朝阳区小红门印刷厂, 1986.
- [50]沈祖治. 水轮机调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [51]刘大恺. 水轮机[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [52]水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册—水力机械分册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [53]DL/T 5058-1996 水电站调压室设计规范[S].
- [54]王佳. 齐热哈塔尔电站过渡过程的研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2013.
- [55]王洋, 王玲花. 水电站过渡过程研究历史及现状综述[J]. 吉林水利, 2014, 9: 29-33.