

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 的带调压室水电站过渡过程仿真研究

RESEARCH OF SIMULATION ON TRANSIENT PROCESS OF
HYDROPOWER STATION WITH SURGE CHAMBER BASED ON
MATLAB

研 究 生 姓 名: 牛秀博

指 导 教 师: 楚清河 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研究成果并撰写完成的。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 的带调压室水电站过渡过程仿真研究

摘 要

水电站引水发电系统运行时常由于负荷及工况的改变而发生瞬态变化, 伴随出现机组转速发生变化及有压引水系统中的水击压力升高或降低现象。当有压引水系统因需要而设置调压室时, 还需要对调压室的涌浪波动问题进行计算。

保证电站水力瞬变过程的稳定及动态过程品质, 是电站对于水轮机调节系统的基本要求。系统的稳定性及动态工作特性, 将直接影响电站的安全运行和所生产的电能质量。因此为保证电站的安全稳定运行, 在电站的项目规划设计阶段及后期运行阶段, 与电站安全运行相关参数的预测及仿真分析工作应充分准备并加以实施。并在其他工程控制措施方面提出建议, 以满足电站最不利运行情况下对过渡过程的品质要求。

本文基于特征线法, 建立了用于电站水力瞬变过程计算的数学模型及相关边界条件。结合某具体工程, 利用 Matlab 软件编制出用于水力瞬变过程计算的电算程序, 对大波动过渡过程进行仿真。优化并确定了导叶关闭时间。通过对调压室的计算, 提出在断面尺寸上对调压室进行优化改进以控制水力过渡过程的措施, 对比阻抗孔及大室尺寸不同时的涌浪水位、隧洞末端压力、蜗壳末端压力, 得到满足规范要求的调压室尺寸值, 为调压室的尺寸确定提供了依据。最后给出在选定关闭时间及调压室尺寸下各拟定工况的调压室涌浪水位及关键部位的压力曲线图。为电站的设计及后期运行提供了理论和技术支持。

关键词: 过渡过程; matlab 仿真; 调保计算; 特征线法

RESEARCH OF SIMULATION ON THE TRANSIENT PROCESS OF HYDROPOWER STATION WITH SURGE CHAMBER BASED ON MATLAB

ABSTRACT

The change of the load and working condition make speed change and phenomenon of water hammer pressure, higher or lower, in the water diversion system of hydropower station. If the surge chamber must to be constructed in the pressure diversion system, it is also need to calculate the problems of the surge of the flood wave.

Ensure the stability and dynamic process quality of hydraulic transient process is the basic requirement of turbine regulating system in power plant .System stability and dynamic performance, will directly affect the safe operation of power plant and power quality. So on the planning and design stage and the late period of running stage of hydropower station, we need to do simulate calculation and forecast analysis for parameters of safe operation of the hydropower station and control it with reasonable engineering measures to meet the quality requirements of transitional process when the hydropower station is in the bad running condition.

In this paper, we built the mathematical model and various boundary conditions used in hydropower station hydraulic transient process analysis based on the numerical method of characteristic. Then we programmed with Matlab and do the simulate calculation of big fluctuation transient process. Optimized the closing law of guide vane. Through the simple analysis to the surge chamber, we put forward the improvement measures on section size of surge chamber optimize to control the hydraulic transition process. By comparing the water level of surge、 the pressure at the end tunnel and the pressure at the ends of spiral case when impedance hole and big room size is different. We get the surge chamber size values conform to the requirements and it provided the basis for the size determined of the surge chamber. On the following, we got the water level of surge chamber and pressure curve in key parts of the control conditions under the selected closing time and surge chamber size. It provides a theoretical and technical support for power station's hydraulic structure design and operation.

KEY WORDS: Transition process; Matlab simulation; Calculation of regulating guarantee; Numerical method of characteristic

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	V
1 绪论	1
1.1 课题提出背景及研究意义	1
1.2 选题的理论意义和实用价值	1
1.2.1 水轮机调节系统过渡过程的研究背景	1
1.2.2 研究水轮机调节系统过渡过程的重要性、目的	2
1.3 水力过渡过程研究现状及发展进程	3
1.3.1 国外研究现状	3
1.3.2 国内研究现状	4
1.4 本文的主要研究内容	5
1.5 本章小结	6
2 水轮机调节系统大波动数学模型建立	7
2.1 有压管道中的非恒定流	7
2.1.1 水击基本方程	7
2.1.1.1 连续方程	7
2.1.1.2 运动方程	10
2.1.2 水击基本方程求解方法	16
2.1.3 有压管道数学模型	17
2.2.2 稳定和收敛条件	19
2.2.3 管道系统的计算时段选择	19
2.2 调压室涌波	19
2.2.1 调压室基本方程	19
2.2.2 调压室涌波与管道水击的联合计算	21
2.3 水轮发电机组过渡过程	22
2.3.1 水轮发电机组数学模型	22
2.3.1.1 发电机动态特性	22
2.3.1.2 导叶关闭规律	22
2.3.1.3 水轮机特性	23
2.4 基本边界条件	23
2.4.1 上游为恒定水位水库	23
2.4.2 下游端为阀门	23
2.4.3 串联管	24
2.4.4 分岔管	25

2.4.5 水轮机边界	25
2.4.5.1 水头平衡方程	26
2.4.5.2 水轮机特性数据获取	26
2.4 本章小结	27
3 调压室的设置及水力计算	29
3.1 调压室的设置条件	29
3.2 调压室基本布置方式及基本类型	29
3.3 波动稳定性及稳定断面确定	29
3.3.1 稳定断面	29
3.3.2 调压室大波动稳定性	31
3.3.3 调压室稳定断面选择	31
3.4 本章小结	32
4 水电站水力过渡过程仿真与分析	33
4.1 工程概况	33
4.2 水电站过渡过程计算方法	34
4.2.1 MATLAB 简介	34
4.2.2 MATLAB 在水电站过渡过程计算中的应用	35
4.3 数据处理	37
4.4 计算准则	40
4.4 仿真计算	40
4.4.1 计算任务	40
4.4.2 计算工况	40
4.4.3 计算结果分析	40
4.5 本章小结	48
5 结束语	49
攻读学位期间参加的科研项目及发表的学术论文	51
致 谢	53
参考文献	55

1 绪论

1.1 课题提出背景及研究意义

我国的水力资源丰富，蕴藏量巨大，水电能源作为高效的清洁能源，在国家能源组成中举足轻重。大力开发水电能源对于缓解我国用电紧张及环境压力等都具有非常重要的作用。目前，国家对西南部水电的开发正在积极进行中，一大批水电站正在有条不紊的建设当中。如何确保电站运行安全稳定，即有效控制其水力过渡过程，具有十分重要的研究价值。

水轮机调节系统由控制对象和调节器两部分组成^[1]。控制对象组成相对较为复杂，由水轮机组段和发电机子系统两部分组成。其中水轮机组段包含有水轮机和水力系统两部分。水力系统又由有压引水管道，调压井和有压尾水三部分组成；发电机子系统包括机械惯性、电压调节和电气三部分。转轮、大轴、转轮区水流转动惯性、转子机械惯性通常合在一起考虑，由于发电机机械惯性约占机械惯性总量的百分之八十至九十，所以把机械惯性归入发电机子系统。发电机端电压由电压调节器控制，在发电机转速变化时，电压同时发生变化，电压调节器动作，所以转速调节和电压调节是相互关联的。电气部分包括发电机电磁部分、输变电部分、电网中的负荷和其他机组等。电站水力过渡过程即电站在运行过程中由于负荷的变化，水轮机导叶时常处于开、关的变换状态，导叶与阀门的关闭与开启，使系统由恒定进入非恒定状态。管道流速及流量、机组转速、调压室水位等随即发生变化，引起管道水击与调压室的水位波动。负荷变化稳定后，系统由于摩擦阻力作用恢复至新的稳定状态。在实际的运行中，这样的情况频繁发生，称为电站水力过渡过程。水轮机调节系统的任务就是在系统的负荷发生变化时，自动调节机组有功功率输出，使机组转始终保持在规定范围以内^[2]。由于被控对象是一个复杂的系统，机组间存在水力联系和电力联系，使得系统的动态特性变得复杂，其次水击作用通常与导水机构的调节作用是相反的，这种相互抵销作用的后果使得对水轮机组段的分析变的复杂^[3]。

1.2 选题的理论意义和实用价值

1.2.1 水轮机调节系统过渡过程的研究背景

水电作为高效的清洁能源，在电网组成中不可或缺。一般水电站通常以固定不变出力运行，担任电网调峰和调频任务的水电站，其出力需要随电网负荷变化而变化，即水电站需要在不同的运行状态间改变，以适应这种变化。除此之外，水电站的运行工况还包括机组起动和机组正常停机工况以及线路故障水电站机组丢弃全部负荷事故工况等。当机组处于过渡工况时水电站引水发电系统中的水流处于瞬变流态，引水发电系统运行因负荷及工况的改变而发生瞬态变化，伴随出现机组转速发生变化及有压引水系统中的水击压力升高或降低现象。为确保水电站运行安全可靠，需要计算水电站各种工况下的

水力过渡过程^[5]，分析所产生的不利影响并采取相关工程措施加以控制。水电站水力过渡过程一般分为^[6]小波动和大波动两类。其中小波动水力过渡过程是指当水电站负荷出现增加或减少时伴随发生的瞬变过程。研究小波动问题在于检验在扰动非常小的条件下系统是否能够保证稳定。水电站大波动水力过渡过程^{[7] [8]}是指水电站丢弃全部负荷工况（或称为甩负荷工况）下伴随发生的水力瞬变过程。甩负荷工况下的水力瞬变过程可能造成机电设备及建筑物的安全事故，给电站造成毁灭性的危害。水电站丢弃负荷后，伴随水轮机导叶迅速关闭，电站压力管道中水击压力急剧升高，同时机组转速快速升高。当水力系统中因需要而设置有调压室时，对应调压室还会出现水位的剧烈变化。这对水力系统会产生极其不利的作用，严重的可能会导致严重的安全事故。所以研究大波动问题在于检验机电设备和水工建筑物是否合理与可靠^[9]。

1.2.2 研究水轮机调节系统过渡过程的重要性、目的

水力过渡过程虽然每次持续时间短，但在电站的实际运行过程中较为常见^[10]，对国内外已发生的电站事故进行研究后，可发现事故发生原因绝大多数是因为不能对水力瞬变进行有效控制而造成的。这一过程中的一些参数，如水击压力、转速等可能出现比常规运行工况大得多的值，从而引起安全问题，如压力管道破裂、调压室损毁和机组部件破坏等严重事故。所以在电站的项目规划设计阶段及后期运行阶段，与电站安全运行相关参数的预测及仿真分析工作应充分准备并加以实施。并在其他工程控制措施方面提出建议，以避免在成类似事故再次发生。

在机组起动和正常停机工况以及因线路故障机组丢弃全部负荷时，导叶进行快速的开启及关闭。伴随出现水力系统中压力钢管及蜗壳部分压力变化以及机组转速变化现象^[11]。此时所要讨论的关键问题是：导水机构采用什么样的关闭规律以及关闭时间为多少时所引起的系统压力升高及机组转速升高能够满足规范要求。当导叶关闭过快时，可能导致系统压力升高超过规范要求，严重的可能引发压力钢管的爆裂^[13]，从而造成安全事故。在水头较大时，上述现象尤其严重。当导叶关闭较慢时，虽能保证压力升高满足要求，但机组转速却升高过大，机组及辅助设备的可靠性无法保证，若不加以严格控制则无法有效确保电厂的安全运行，所以研究人员应特别加以重视。从以上描述可知，导叶如何关闭才能满足电站对压力及转速升高的要求是我们研究的重点。但是，由于自然条件及其它条件的差异，当电站的引水管道很长时，单单对关闭规律进行改进仍然无法满足相关要求，这时就应采取相应工程措施（增加调压设备，调压室或调压阀）以控制压力上升^[14]。采取这些工程控制措施前，对于是否应该设置以及设置什么样的形式等相关问题，都应在水力瞬变计算的基础上进行确定。

因此，在电站的项目规划设计阶段，与电站安全运行相关参数的预测及仿真分析工作应充分准备并加以实施。并在其他工程控制措施方面提出建议，以满足电站最不利运行情况下过渡过程的品质要求。考虑当前的经济技术水平和各种评价要素，选出最合理的电站及机组设计方案^[15]。

综合以上对水力瞬变的描述，可知：为确保水电站运行安全可靠，需要对水电站各

种工况下的水力过渡过程进行计算，求出各控制工况下的调保参数及调压室涌浪水位等，了解其动态特性，分析所产生的不利影响并采取相应措施加以控制^[16]。同时，为使电站运行更加经济高效，对导叶关闭及其他工程措施方案的改进也应同时进行研究。

1.3 水力过渡过程研究现状及发展进程

随着计算机技术的飞速发展，水力过渡过程计算领域越来越多的对其进行了应用，计算机拥有计算速度快、精度高、容量大等常规计算方法无法比拟的特点，使得我们在研究水力过渡过程上有了较大的发展与突破，传统方法在对复杂管路系统、摩阻损失、水轮机特性处理及引水系统中的两种非恒定流计算等方面都存在较大的误差，计算机的应用可以有效改善对这些方面的计算，对水电站的水力计算、优化分析、及稳定安全运行具有重要的研究作用。

1.3.1 国外研究现状

一九八九年，前苏联科学家儒柯夫斯基通过对管道水击的试验，发表了关于管道水击的经典理论，得出儒可夫斯基公式，即计算管道水击的方程式，给出了管道流量与压力升高在水击压力计算中的关系。使得水力瞬变计算方面的研究深度和广度得到较大发展。水击计算现已成为水力学一门重要的科学分支。在管道系统设计等方面得到广泛应用。

进入二十世纪，随着经济技术的发展，一大批水电站及抽水蓄能电站建成，引水系统及机组过渡过程方面的问题及与此相关的经济投资问题日益突出，亟待解决。水力过渡过程计算问题再次得到发展。意大利科学家 Allievi 在前人的理论分析基础上，引进了水击常数这一概念，发表了一系列关于水击理论与计算方面的文章，为现代水击分析理论的建立奠定了基础。

一九四零年后，大批低水头水电站在苏联的到兴建随之带来的问题就是大容量机组所带来的过渡过程问题，尤其八十年代后期，卡霍夫和尼沃兹克水电站由于甩负荷后控制规律不良，导致反水锤造成抬机事故，厂房被淹及励磁零件的损毁。过渡过程问题的研究亟待解决。此期间，克里夫琴科对电站过渡过程方面的研究取得较大成果，发表出版了《水电站动力装置中的过渡过程》一书，针对一系列问题提出重要观点

二十世纪五十年代，耶格尔^[17]对调压室使用条件及水力计算方面进行了深入研究，得出较为重要的成果，并发表了《调压室设计的近代趋势》一书，对调压室稳定断面与稳定断面与稳定断面之间的比值以及调压室波动衰减等问题进行了重要阐述^[18]。

二十世纪六十年代，美国流体学研究专家怀利和斯特里特^[19]对瞬变流理论进行了深入研究，发表了一些列重要论文，并在其《瞬变流》一书中详尽阐述了过渡过程的计算求解理论与模式，并给出计算机在管道水击计算应用中的研究成果，怀利还给出了自由气体-离散模型，并给出此模型的应用条件，对管道气液两相瞬变流研究的发展具有十分重要的意义。

二十世纪六十年代，在调压室稳定及涌浪水位计算方面，Pickford 和 Quilet 给出重

要阐述。Qulet 将调压室水位波动基本方程经线性化处理后, 根据霍尔维兹判据来判定调压室的波动稳定性。并将调压室水位波动的稳定域以无因此参数形式给出, 用以修改优化调压室断面的最初拟定值。Pickford^[20]对调压室涌浪水位计算方面进行了研究, 在《以对数曲线来进行调压室波动计算》一文中给出利用对数曲线求取调压室最高及最低涌浪水位的详尽阐述。

二十世纪六十年代后, 随着计算机技术与先进动态测量技术在过渡过程的应用, 过渡过程研究得到较大发展, 利用计算机进行数据采集和处理使得模型试验与模拟计算中的复杂过渡过程计算得以实现。特征线法、水轮机尾水系统反水击、引水系统两相流计算、引水系统的联合计算等一些列关于过渡过程计算的方法、理论模型得以发表^[21], 使水电站水力计算得到进一步发展。

二十世纪七十年代, 福克斯和秋元德三分别发表了《管网中的不稳定流的水力分析》、《水击与压力脉动》。赛斯^[22]对水击波动穿过调压室底部传播到有压隧洞的问题做出报告, 得出结论: 阻抗式调压室与简单圆筒式调压室相比, 在相同最高涌浪水位的条件下, 体积仅为后者的百分之三十至四十。Sethuramen^[23]提出阻抗式调压室波动稳定方程的数值解法。Li Yu Tek^[24]给出阻抗式调压室波动与稳定分析的计算程序, 并结合实例进行了验证。

对于机组等开度与等流量调节时调压室的波动稳定性, 弗朗克和希勒^[25]在考虑压力隧洞摩阻的情况下, 借助积分图解方程, 得出其总是稳定的结论。托马斯^[27]通过研究证明在断面面积小于某一临界值时, 调压室即出现非稳定的状况。这个临界值被称为托马临界断面。Marris 和 Sideriades^{[27] [28]}证明在大波动情况下托马准则并不适用。在机组等出力全开度工况下, RuuS^[29]利用计算机对调压室稳定性进行分析, 证实小波动对稳定性的威胁更大。

1.3.2 国内研究现状

改革开放后, 随着国家经济水平的不断发展, 我国水电事业发展迅速。新开发的水电基地建设正有条不紊的进行, 水电站水力过渡过程计算方面的研究也取得了长足进展。

一九八零年, 董兴林在不考虑次要因素的条件下, 对调压室的稳定断面问题进行了研究。推导得出了调压室断面的计算公式。并发表《水电站调压室稳定断面问题的研究》一文。指出在调速器参数整定合理的情况下, 即使调压室断面面积小于托马断面, 水电站也可稳定运行。但该结论具有一定的局限性。

一九九二年, 董兴林^[30]对大朝山水电站引水系统中的尾水调压室进行稳定断面分析, 通过数值计算, 在考虑所有稳定条件的前提下, 得出水调系统的稳定域。并指出可通过增大调速器参数来减小稳定断面。

对于水电站水力瞬变中由于调压室漏空引起的管道气液两相流问题, 董兴林和杨开林利^[31]用模型试验进行了研究, 结果证实, 该情况下的气液两相流可用离散模型进行模拟。叶宏开等人对怀利所阐述的自由气体-离散模型作了进一步改进。

对于在受简谐振动时的调压室水压力分布情况及气垫式调压室的水击穿室问题,马吉明^[32]等人进行了深入研究,分析推导出计算水击压力的解析公式,同时由水击基本方程与调压室边界条件方程,分析推导出水机击穿系数的计算解析公式。并指出在结构上气垫式调压室可以有效进行水击波的反射,达到改善机组运行条件的要求。

对于引水系统中分岔管处速度水头和动量交换项对尾水调压室的影响,杨建东等人在利用托马断面的条件下运用加登的 T 型分岔管水头平衡关系式,推导得出该情况下的计算解析公式。并指出可通过对分叉管的形式及尺寸的选择,达到减小调压室稳定断面面积的目地。对于调压室稳定断面的研究,国内外学者一直进行着不懈的探究,哪些因素对稳定断面有影响及如何进一步减小断面面积进一步减小水利投资,他们从不同的角度进行了研究。

现今,对水电站水力过渡过程的研究国内外都取得了巨大的成果,但是随着研究的进一步深入,又出现了更多新的问题,例如:(1)在突增负荷的情况下,压力引水管道中,因水柱脱离而导致的气压与水击联合分析;(2)对水击共振的进一步研究,如:共振性态、产生原因等;(3)有压引水系统中,通过掺气降低水击波速以达到减小水击压力的问题;(4)影响水击的因素,如:非线性导叶启闭规律、波形水头与流速水头等,及结合实际的应用情况。

随着现代计算机技术的飞速发展,水力过渡过程计算由传统的解析法、图解法演变为利用计算机模拟的数值解法。现代计算机运算速度快,存储容量大,计算精度高使我们可以有效利用计算结果为电站的优化设计及安全稳定运行提供依据。

1.4 本文的主要研究内容

根据在过渡过程领域已取得的相关研究成果,在此基础之上提出本文的主要研究内容。根据电站引水发电系统的布置及建筑物组成,基于特征线法,建立计算数学模型,并对水轮机全特性加以研究。然后根据工程实际情况及计算要求,编制出相应的电算程序。最终实现对电站过渡过程的仿真。

主要成果如下:

(1)对有压引水系统及机组非恒定流的基本方程进行了推导。介绍了水击基本方程的实用解法,并对特征线法进行了详细说明。在此基础之上建立了多种边界条件(模型建立过程中水流方向、非线性、摩阻等均考虑在内),结合初始条件可实现了水击压力波及调压室质量涌波的联合计算。

(2)结合某水利工程,拟定各计算工况,并利用 Matlab 编制出电算程序,实现对大波动过渡过程的计算仿真。通过计算优化确定了导叶关闭时间。通过对调压室的涌浪计算及对调压室稳定问题的讨论,得到满足规范要求的调压室尺寸值,为调压室的尺寸确定提供依据。最后给出在选定关闭时间及调压室尺寸下各拟定工况的调压室涌浪水位及关键部位的压力曲线图。为电站的水力结构设计及后期运行提供了理论支持。

1.5 本章小结

本章首先对论文的选题背景及研究意义进行阐述，然后分别介绍了水轮机调节系统和过渡过程的基本概念以及在实际生产生活中研究过渡过程的重要性。查阅国内外在该领域的研究成果，在此基础上提出本文的研究内容。

2 水轮机调节系统大波动数学模型建立

水电站水力过渡过程计算包括有压引水系统非恒定流计算和机组过渡过程计算^[33]。机组运行工况改变时，有压引水系统中的非恒定流^[34]分为两类：有压引水管道中的水击现象和调压室中的质量涌波。分析水击时，按是否考虑水体及管壁弹性，将水击分为两种^[35]：弹性水击和刚性水击。对水电站有压引水系统中两种非恒定流进行联合计算，对电站的安全稳定运行具有十分重要的意义。

2.1 有压管道中的非恒定流

2.1.1 水击基本方程

有压引水管道非恒定流基本方程，即水击基本方程。在对水击基本方程进行推导前，先作以下假定^[36]：

(1)有压管中水流按一元流考虑，流速在有压管截面上的分布也认为是均匀的^[37]。

(2)考虑管壁和水体弹性。且其应力与应变成比例。对于大多数管道，这样假定相对来说比较符合实际。

(3)计算非恒定流摩阻损失的公式与恒定流相同。海罗斯针对随频率变化的阻力损失，提出一种经验公式，但公式太过复杂，应用起来也很麻烦。

2.1.1.1 连续方程

连续方程的推导过程中： t 为时间； x 、 Q 和 v 分别为距离、流量和流速；均以指向下游为正。

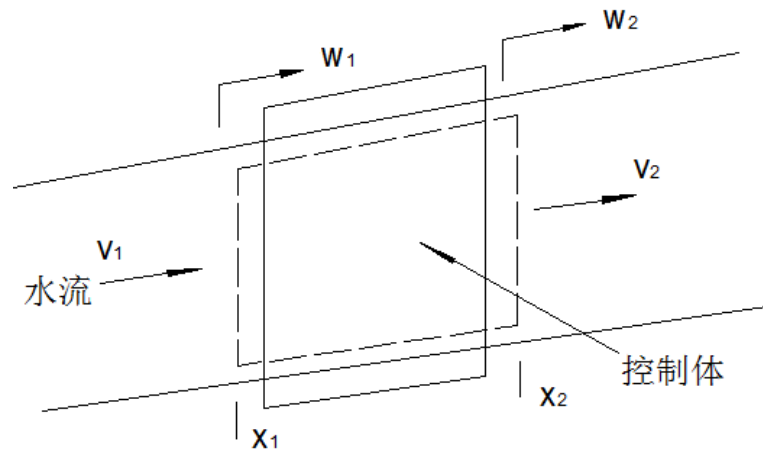


图2-1连续方程符号

Fig 2-1 Continuous equation symbol

对管道中水流取隔离体，如图所示，取上下两个断面与管体组成隔离体。对隔离体中水流进行受力分析。管内虚线所示为管壁变形和水体压缩前的控制体，管外实线所示

为管壁变形和水体压缩后的控制体。依据质量守恒原理^[38]，对上述水体分析后可写出如下方程：

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} \rho A dx + \rho_2 A_2 (v_2 - W_2) - \rho_1 A_1 (v_1 - W_1) = 0 \quad (2-1)$$

式中，第一项表示管壁变形和水体压缩引起的控制体的净质量变化率，第二项表示流出控制体的质量的净质量变化率，第三项表示流入控制体的质量的净质量变化率。

上式第一项应用莱布尼兹法则得出下式：

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho A) dx + \rho_2 A_2 \frac{dx_2}{dt} - \rho_1 A_1 \frac{dx_1}{dt} + \rho_2 A_2 (v_2 - W_2) - \rho_1 A_1 (v_1 - W_1) = 0 \quad (2-2)$$

因式中 $\frac{dx_2}{dt} = W_2$ 和 $\frac{dx_1}{dt} = W_1$ ，所以上式可简化为

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho A) dx + (\rho A v)_2 - (\rho A v)_1 = 0 \quad (2-3)$$

根据中值定理，这个方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A) \Delta x + (\rho A v)_2 - (\rho A v)_1 = 0 \quad (2-4)$$

式中 $\Delta x = x_2 - x_1$ 。

让式(2-4)除以 Δx 。当 Δx 趋于零时，式(2-4)可写为：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho A v) = 0 \quad (2-5)$$

对上式中各项偏微分进行展开，可以得到式(2-6)：

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial A}{\partial t} + \rho A \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial A}{\partial x} + A v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (2-6)$$

用全微分代替偏微分并用 ρA 除以上式，整理后得到

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

为了用压力 p 和密度 ρ 表示这个方程，对液体的体积弹性变量作如下定义：

$$K = \frac{dp}{\frac{d\rho}{\rho}} \quad (2-8)$$

式(2-8)可表示为

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{K} \frac{dp}{dt} \quad (2-9)$$

对于圆形管半径为 R 时， A 的微分形式：

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R \frac{dR}{dt} \quad (2-10)$$

在式中引入管壁相对变形 ε ，上式可表示为

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R^2 \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad (2-11)$$

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2-12)$$

假定管壁材料是线弹性的（即变形与应力成比例），这个假定对大部分材料如钢材、木材、混凝土等是正确的。根据这个假定，我们可写出下面的方程：

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2 - \mu\sigma_1}{E} \quad (2-13)$$

式中 σ_1 为环向应力， σ_2 为轴向应力， μ 为泊松比， E 为弹性模量。

为了简化推导，假定管道的支承使管可沿它的整个长度自由伸缩。对于另外的管道支承型式，只需对泊松公式稍作修正。因此，上式中 $\sigma_1=0$ ，式（2-13）可简化为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2}{E} \quad (2-14)$$

薄壁管的环向应力为

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2e} \quad (2-15)$$

式中， e 为管壁厚度； p 为管内压力； D 为管道的直径。将所得管道环向应力公式对时间进行微分，从而得到：

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{p}{2e} \frac{2D}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (2-16)$$

将（2-14）代入上式，得到：

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{p}{2e} \frac{2D}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (2-17)$$

由（2-10）和（2-12）推得 $D \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dD}{dt}$ ，将其带入（2-17），得到：

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{pD}{2e} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (2-18)$$

上式可以简化为：

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\frac{D}{2e} \frac{dp}{dt}}{E - \frac{pD}{2e}} \quad (2-19)$$

由式（2-12）和式（2-19），可得到下式：

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{\frac{D}{e} \frac{dp}{dt}}{E - \frac{pD}{2e}} \quad (2-20)$$

将（2-9）和（2-20）代入（2-7），整理后得到：

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{\frac{Ee}{D} - \frac{p}{2}} \right) \frac{dp}{dt} = 0 \quad (2-21)$$

由于实际应用中，大多数情况 $\frac{p}{2} \ll \frac{Ee}{D}$ ，所以方程可改写为

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{\frac{Ee}{DK}} \right) \frac{dp}{dt} = 0 \quad (2-22)$$

让我们作如下定义：

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{DK}{Ee}} \quad (2-23)$$

式中， a 为水击波在弹性管和可压缩液体中的传播速度。

将 (2-23) 和 $\frac{dp}{dt}$ 全微分表达式代入 (2-22)。可得如下连续方程：

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2-24)$$

2.1.1.2 运动方程

有压管道中水流随时间做瞬变运动。推导有压管中的水流运动方程前，如前面推导连续方程时一样。取两个靠近的断面和管壁组成隔离体。如图 2.2 所示。

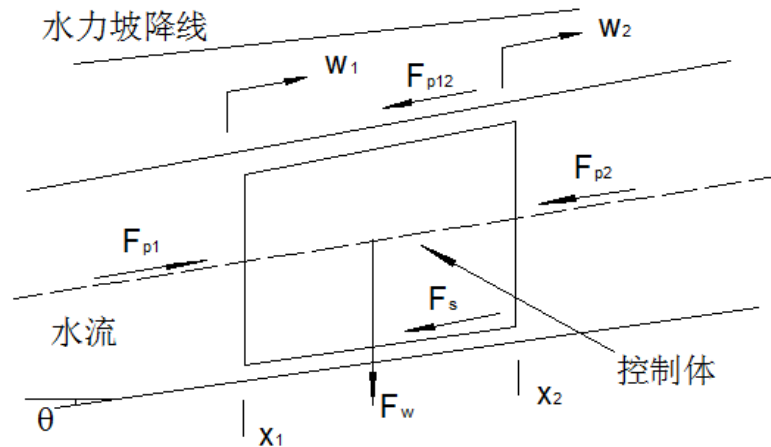


图2-2 连续方程符号

Fig 2-2 Equation of motion symbol

对图中所示隔离体作受力分析，依据牛顿第二定律^[39]可列出以下方程：

$$\frac{dM}{dt} = \sum F \quad (2-25)$$

式中：\$M\$ 为水体动量；\$F\$ 为所受到的力。

由于 \$\frac{dx_1}{dt} = W_1\$ 和 \$\frac{dx_2}{dt} = W_2\$，\$\frac{dM}{dt}\$ 可表示为：

$$\frac{dM}{dt} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho A v) dx + (\rho A v)_2 W_2 + (\rho A v)_1 W_1 + [\rho A (v - W) v]_2 - [\rho A (v - W) v]_1 \quad (2-26)$$

式中：\$x\$ 和 \$t\$ 分别为距离和时间；\$Q\$ 为流量；\$v\$ 为断面平均流速。由式(2-25)可得

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho A v) dx + (\rho A v)_2 W_2 + (\rho A v)_1 W_1 + [\rho A (v - W) v]_2 - [\rho A (v - W) v]_1 = \sum F \quad (2-27)$$

对上式第一项应用中值定理，简化上式并用 \$\Delta x\$ 除式中各项，得到

$$\frac{\sum F}{\Delta x} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho A v) + \frac{(\rho A v^2)_2 - (\rho A v^2)_1}{\Delta x} \quad (2-28)$$

作用在控制体上的力由三部分组成，即两横截面的压力、周围的摩擦力（或粘滞阻力）和水体所受的重力。隔离体上所受的各种力可表示如下：

$$\begin{aligned} F_{p1} &= p_1 A_1 \\ F_{p2} &= p_2 A_2 \\ F_{p12} &= \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (A_1 - A_2) \\ F_s &= \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \\ F_{wx} &= \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta \end{aligned} \quad (2-29)$$

可将所受的合力 \$\sum F\$ 表示为：

$$\sum F = p_1 A_1 - p_2 A_1 - \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (A_1 - A_2) - \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta - \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \quad (2-30)$$

整理上式得

$$\sum F = \frac{1}{2} (p_1 - p_2) (A_1 + A_2) - \rho g A (x_2 - x_1) \sin \theta - \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \quad (2-31)$$

用 \$\Delta x = x_2 - x_1\$ 除上式，得到下式：

$$\frac{\sum F}{\Delta x} = \frac{(p_1 - p_2) (A_1 + A_2)}{2 \Delta x} - \rho g A \sin \theta - \tau_0 \pi D \quad (2-32)$$

将式 (2-32) 代入式 (2-28)。令 \$\Delta x\$ 趋于零，取极限，可得：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A v) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A v^2) + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \sin \theta + \tau_0 \pi D = 0 \quad (2-33)$$

基于前面所作的假设，用达西—威西巴赫公式计算水流阻力，即

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \rho f v |v| \quad (2-34)$$

式中，\$f\$ 为达西-威西巴赫阻力系数。将流速 \$v^2\$ 写成 \$v|v|\$ 是为了适应考虑水体的反向流动。把上面的阻力公式 (2-34) 代入 (2-23)，同时对圆括号项进行展开，可得下式：

$$v \frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \rho A \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}(\rho A v) + \rho A \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} A \rho \sin \theta + \frac{\rho A f v |v|}{2D} = 0 \quad (2-35)$$

再将上式整理后得到

$$v \frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \rho A \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}(\rho A v) + \rho A v \frac{\partial v}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \sin \theta + \frac{\rho A f v |v|}{2D} = 0 \quad (2-36)$$

由式 (2-5), 即 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A v) = 0$

因此, 可去掉式 (2-36) 中方括号中的各项, 并除以 ρA , 得到如下运动方程:

$$v \frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \rho A \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \quad (2-37)$$

连续方程 (2-24) 和运动方程 (2-37) 是一组一阶偏微分方程, 距离 x 和时间 t 是方程组的两个变量。其中非线性项全部是一阶导数, 即方程是拟线性的。又可进一步分为椭圆型、抛物线型与双曲线型三种类型。为便于做进一步分析, 可将方程组表示为如下矩阵形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v & \rho a^2 \\ \frac{1}{\rho} & v \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \sin \theta - \frac{f v |v|}{2D} \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

或

$$-\frac{\partial}{\partial t} U + B \frac{\partial}{\partial x} U = E \quad (2-39)$$

式中:

$$U = \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} v & \rho a^2 \\ \frac{1}{\rho} & v \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \sin \theta - \frac{f v |v|}{2D} \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

方程组 (2-38) 类型由矩阵 B 的特征值 λ 决定。矩阵 B 的特征方程可写为

$$(v - \lambda)^2 = a^2 \quad (2-41)$$

因此

$$\lambda = v \pm a \quad (2-42)$$

由上式可知, 特征值为两个不同的实数, 所以方程组为双曲线型偏微分方程组^[40]。

通常方程中的 $v \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)$ 、 $v \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)$ 和管道堤坡项很小。所以进行实际计算时, 方程组中

的迁移加速度项和管道底坡项通常被忽略不计。简化后方程如下:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2-43)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \quad (2-44)$$

在实际工程应用中，通常管道的压力 p 用测压管水头 $H - z$ 代替，如图 2-3 所示，并且第二个变量 v 用流量代替。压力 p 和流量 Q 可以写为

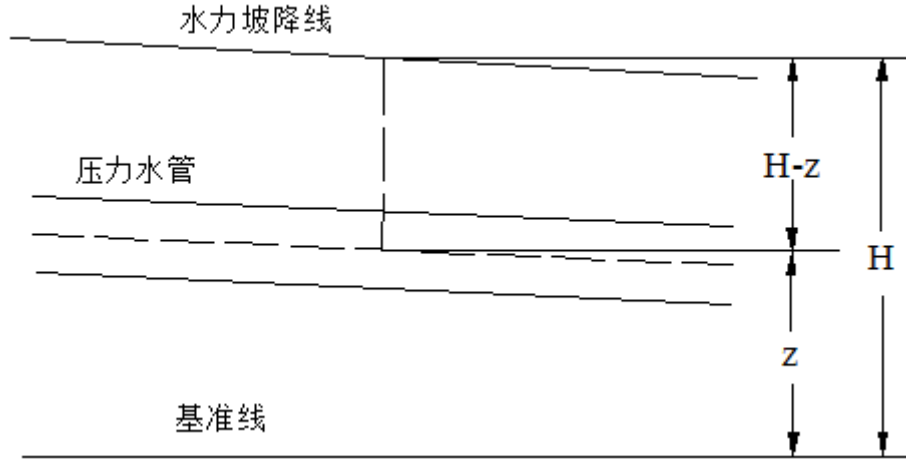


图2-3 方程简化示意图

Fig 2-3 Schematic diagram of equation simplified

$$p = \rho g (H - z) \quad (2-45)$$

$$Q = vA \quad (2-46)$$

式中： z 为管道中心距指定基准面以上高度； $H - z$ 为测压管水头。

假定流体的压缩性和管道的变形很小，因此可以忽略由于压力变化引起的液体密度 ρ 和管道面积 A 的变化，通常将这种影响考虑在水击波速中。对于不可压缩液体和刚性管，水击波速是无限的，即管道中压力和流速变化瞬时同时通过整个管道，对于水平管道， $\frac{dz}{dx} = 0$ 。由式 (2-45) 得到

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \rho g \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad (2-47)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (2-48)$$

把式 (2-45) ~ (2-48) 代入式 (2-43) 和式 (2-44)。得到如下方程：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) = 0 \quad (2-49)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + Ag \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2-50)$$

恒定流状态时，有 $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$ 和 $\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$ ，即管道中的水头和流量随时间恒定。将上述

关系式代入式 (2-49) 和式 (2-50)，可以得到恒定流的公式。由式 (2-49) 可得 $\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ ，

即流量沿整个管道不变。以 $\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$ 代入式 (2-50)，然后将所得方程化简并用差分代替微分，可得下式：

$$\Delta H = \frac{f \Delta x Q^2}{2gDA^2} \quad (2-51)$$

式中， ΔH 表示管中流量为 Q 时，沿整个管道 Δx 上的水头损失不变。式 (2-51) 与 Dracy-Weisbach 阻力公式相同。我们用 (2-49) 和 (2-50) 进行压力管道水击计算。如推导这两个方程的假设不满足，则应该用式 (2-24) 和式 (2-37) 进行压力管道水击计算。

水击波速：

由前面的式 (2-23) 可得到如下考虑液体被压缩和管壁变形的水击波速公式：

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{DK}{Ee}}} \quad (2-52)$$

如忽略液体被压缩和管壁变形，则得到如下刚性管水击波速公式：

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2-53)$$

式 (2-52) 所表示的水击波速公式并没有考虑管道外部约束影响。 K 与温度、压力和气体含量有关。佩尔斯给出结论：温度改变 5°C ，波速大概改变 1%。实验表明^[41]，如果水中含体积万分之一的的气体，波速减小约百分之五十。液体中含固体粒子有类似影响，但影响较小，除非固体粒子是可以压缩的。溶解在水中的气体，当压力减小时趋于从水中分离出来，即使压力在汽化压力以上也如此。所以正压波的波速大于负压波。为了考虑管中水体的压缩性和管道特性对波速的影响，Halliwell 给出如下波速公式：

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left[1 + \left(\frac{K}{E} \right) \psi \right]}} \quad (2-54)$$

各种情况下 ψ 的计算公式如下：

1. 刚性管：

$$\psi = 0 \quad (2-55)$$

2. 厚壁弹性管：

(1) 管子全管固定，整个管道不能产生轴向位移

$$\psi = 2(1 + \mu) \left[\frac{R_0^2 + R^2}{R_0^2 - R^2} - \frac{2\mu R^2}{R_0^2 - R^2} \right] \quad (2-56)$$

式中： μ ：泊松比；

R 、 R_0 ：管道内、外半径。

(2) 管子上段固定，使道上端不能产生轴向位移

$$\psi = 2 \left[\frac{R_0^2 + 1.5R^2}{R_0^2 - R^2} - \frac{\mu(R_0^2 - R^2)}{R_0^2 - R^2} \right] \quad (2-57)$$

(3) 具有伸缩节的水管

$$\psi = 2 \left(\frac{R_0^2 + R^2}{R_0^2 - R^2} + \mu \right) \quad (2-58)$$

3. 薄壁弹性管：

(1) 全管固定，管道不能产生轴向位移

$$\psi = \frac{D}{e} (1 - \mu^2) \quad (2-59)$$

式中： e 为管壁厚， D 为管的直径。

(2) 管子上段固定，使道上端不能产生轴向位移

$$\psi = \frac{D}{e} (1.25 - \mu) \quad (2-60)$$

(3) 具有伸缩节的水管

$$\psi = \frac{D}{e} \quad (2-61)$$

4. 衬砌和不砌隧洞：

对于衬砌和不砌的岩石隧洞，赫利威尔导出了考虑岩石特性的 ψ 计算公式。但是，岩石特性目前尚不能准确估计，因而不适合实际的应用。以下介绍帕马肯的公式。

(1) 不衬砌隧洞

$$\begin{cases} \psi = 1 \\ E = G \end{cases} \quad (2-62)$$

式中， G 为岩石的弹性模量。

(2) 钢板衬砌隧洞

$$\psi = \frac{DE}{GD + Ee} \quad (2-63)$$

式中， e 为衬砌钢板的厚度； E 为衬砌钢板的弹性模量。

5. 钢筋混凝土管：

通常引进等价钢管的概念对该情况进行计算。按下式计算：

$$e_e = E_r e_c + \frac{A_s}{l_s} \quad (2-64)$$

式中， e_c 为钢筋混凝土管的厚度， A_s 和 l_s 分别为钢筋的面积和间距， E_r 为混凝土弹性模量与钢性模量的比值。一般 E_r 的变化为 0.06~0.1，考虑到混凝土产生裂缝，建议用 0.05。算出 e_e 后，波速可用钢的弹性模量按式 (2-54) 计算。

2.1.2 水击基本方程求解方法

由上推导出的水击基本方程，即式(2-24)和(2-37)，及这组方程的简化形式(2-49)和(2-50)。经上面分析可知，水击基本方程是一组双曲线型偏微分方程。基于水击简化方程得到的解析法和图解法，在管道水击计算中过去用的很多。随着计算机的普遍应用，求解方法更多的选择了差分法和特征线法^{[42][43]}。特征线法^[44]基本原理是：首先将水击偏微分方程变成特殊的全微分方程。然后对全微分进行积分，得到用于求解的有限差分方程。特征线法相较于其他方法，尤其是当系统边界较为复杂，系统本身相对较大时，具有较为突出的特点。

令运动方程(2-50)为 L_1 ，连续方程(2-49)为 L_2 ，则有

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + Ag \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + RQ|Q| = 0 \quad (2-65)$$

$$L_2 = Ag \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2-66)$$

式中， $R = \frac{f}{2DA}$ 。

沿特征线式(2-65)和式(2-66)可转变为全微分方程。对全微分方程进行积分，可得到用于求解的有限差分方程。对式(2-65)和式(2-66)进行线性组合： $L = L_1 + \lambda L_2 = 0$

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda Ag \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + RQ|Q| = 0 \quad (2-67)$$

如果 $H = H(x, t)$ 和 $Q = Q(x, t)$ ，则他们的全微分可写为

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2-68)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2-69)$$

定义未知因子为 λ

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \quad (2-70)$$

即

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (2-71)$$

将(2-68)、(2-69)和(2-71)代入(2-67)，可得：

$$\frac{dQ}{dt} = a \quad (2-72)$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Ag}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (2-73)$$

和

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (2-74)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{Ag}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (2-75)$$

方程 (2-72) 和 (2-74) 代表 $x \sim t$ 平面上两条直线, 称为特征线。其中式 (2-72) 称作正特征线方程, 用 C^+ 表示; 式 (2-73) 称为正特征线上成立的相容性方程, 即式 (2-72) 满足, 则方程 (2-73) 成立。式 (2-74) 称作负特征线方程, 用 C^- 表示; 式 (2-75) 称为负特征线上成立的相容性方程, 即式 (2-74) 满足, 则方程 (2-75) 成立。

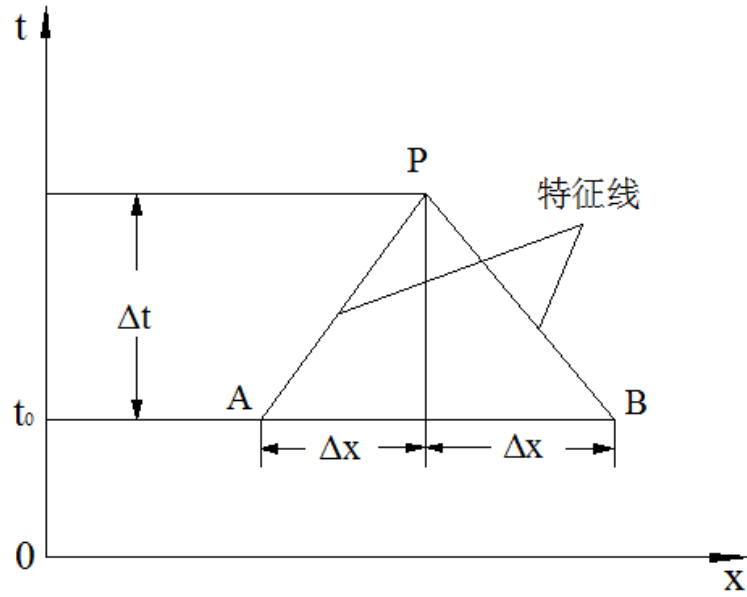


图 2-4 特征线
Fig2-4 Characteristic line

2.1.3 有压管道数学模型

利用特征线方程求解管道水击: 求解管道水击 (即式 (2-72) ~ (2-75)) 的方法, 通常有一阶有限差分法、二阶有限差分法、同时使用一阶有限差分和二阶有限差分法、预估校正法等^{[45][46]}。在实际应用中, 一阶有限差分法结果已足够精确, 故通常采用一节有限差分。若系统阻力损失较大, 这是一阶差分可能产生不稳定结果, 这时则采用二阶有限差分或预估校正法。

如图 2-4 所示, 假定在 $t = t_0$ 时系统的状态为已知。即系统状态不是 $t = 0$ 时的初始稳定状态, 就是前一时段已经计算出来的状态。我们需要计算的是 $t = t_0 + \Delta t$ 时系统的未知状态。用 dt 乘以式 (2-73), 并积分, 得到:

$$\int_A^P dQ + \frac{gA}{a} \int_A^P dH + R \int_A^P Q|Q| dt = 0 \quad (2-76)$$

第三项中 Q 沿正特征线 AP 是变化的。采用一阶近似, 用 Q_A 表示:

$$R \int_A^P Q|Q| dt \cong RQ_A|Q_A|(t_P - t_A) = RQ_A|Q_A|\Delta t \quad (2-77)$$

因此，式 (2-76) 可写为

$$Q_P - Q_A + \frac{Ag}{a}(H_P - H_A) + RQ_A|Q_A|\Delta t = 0 \quad (2-78)$$

对于负特征线。同理可得

$$Q_P - Q_B + \frac{Ag}{a}(H_P - H_B) + RQ_B|Q_B|\Delta t = 0 \quad (2-79)$$

方程式 (2-78) (2-79) 可以写成如下形式。

正特征方程：

$$Q_P = C_m - C_a H_P \quad (2-80)$$

负特征方程：

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad (2-81)$$

式中：

$$C_m = Q_A + \frac{Ag}{a} H_A - RQ_A|Q_A|\Delta t \quad (2-82)$$

$$C_n = Q_B + \frac{Ag}{a} H_B - RQ_B|Q_B|\Delta t \quad (2-83)$$

$$C_a = \frac{Ag}{a} \quad R = \frac{f}{2DA} \quad (2-84)$$

$$Q_P = 0.5(C_m + C_n) \quad (2-85)$$

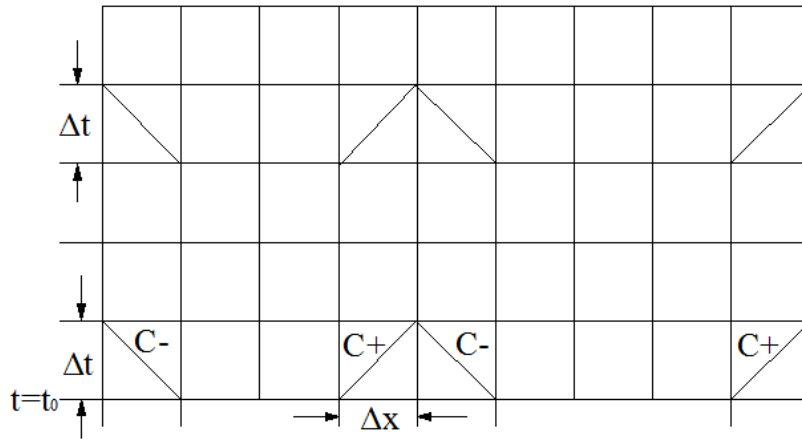


图 2-5 简单管道网格图
Fig2-5 Simple pipeline grid

综上所述，以简单管道系统为例。在 $x-t$ 平面上，以时间为纵坐标，按 Δt 等分；以距离为横坐标，按 Δx 等分。最终得到网格图（如图 2-5）。其中管道各截面表示为横坐标上分布的各点，称之为节点。计算时即要求求得各个断面上的状态变量值。初始时刻 $t=t_0$ 时，管道中水流恒定，按恒定流求各个截面的状态，即初始状态。对于内部各节点 $t_0 + \Delta t$ 时刻的状态。由前一时刻该节点的状态，联立特征方程即可求出这一时刻的状态。

由图可知, 计算上游边界节点状态时, 需要联立负特征方程和上游边界进行计算。计算下游边界节点状态时, 需要联立正特征方程和下游边界进行计算。此刻, $t_0 + \Delta t$ 时的系统状态完全求出, 然后按照上述步骤计算 $t_0 + 2\Delta t$ 时的系统状态即可。对于要研究的系统内某节点的某一时刻各变量的值, 按照同样的计算步骤依次进行计算即可。

2.2.2 稳定和收敛条件

上述的有限差分中, 当 Δt 和 Δx 趋于零时, 能够得到精确的解, 这个解接近于原微分方程的解, 认为计算是收敛的。普肯斯、柯兰特指出, 满足以下条件, 差分方程 (2-78) 和 (2-79) 的计算是稳定的^[47]。

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} < \frac{1}{a} \quad (2-86)$$

即, 通过 P 点的特征线不应落在 AB 线段以外。对于中心差分格式条件为

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{a} \quad (2-87)$$

只要方程 (2-87) 满足差分格式就可以得到精确的解。即有限差分方程的稳定或收敛条件为

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad (2-88)$$

2.2.3 管道系统的计算时段选择

对于有两个或两个以上管道组成的复杂管道系统, 应对所有管道使用相同的计算时段进行计算, 以便在管道连接处利用边界条件。且所选时段应满足柯兰特稳定条件。乔德里提出对波速进行调整以选择公共计算时段 Δt , 即通过适当调整波速以满足下式^[33]

$$\Delta t = \frac{L}{a_i n_i} (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-89)$$

式中: n_i 为整数并等于 i 号管所分成的段数;

a_i 为 i 号管 号管的水击波速;

n 为管道系统中管子数量;

当水击波速不能确切知道时, 允许进行少量调整。

2.2 调压室涌波

2.2.1 调压室基本方程

以阻抗式调压室为例来分析推导调压室的基本方程。

假定条件:

(1) 隧洞沿线壁面为刚性的, 水体不可压缩。即水流变化立刻反应到整个系统。

(2) 调压室水体惯性忽略不计。

(3) 恒定流水头损失公式在此处适用。

运动方程:

作用在隔离体正方向上的力的总和应等于隔离体的动量变化率，即

$$\sum F = \frac{\gamma f L}{g} \frac{d}{dt} \left(\frac{Q_t}{f} \right) \quad (2-90)$$

式中； L 、 f 依次为隧洞长度和截面积； Q_t 为隧洞的流量；隔离体的质量为 $\frac{\gamma f L}{g}$ 。

作用在隔离体上的力包括：

$$F_1 = \gamma f (H_0 - h_j - h_v) \quad (2-91)$$

式中， H_0 为静水头； h_j 为进水口水头损失； h_v 为流速水头； f 为隧洞的摩阻损失。

$$F_2 = \gamma f (H_0 - Z_s) \quad (2-92)$$

式中， Z_s 为调压室水位（水库静水位之上取正）。

$$F_2 = \gamma f h_f \quad (2-93)$$

所以有

$$\sum F = \gamma f (Z_s - h_j - h_v - h_f) \quad (2-94)$$

将方程（2-94）代入（2-90），并用 $cQ_t|Q_t|$ 表示水头损失（ c 为水头损失系数），则有

$$\frac{dQ_t}{dt} = \frac{gf}{L} (Z_s - cQ_t|Q_t|) \quad (2-95)$$

连续方程：

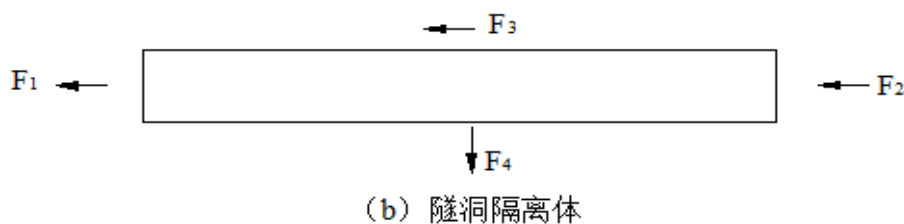
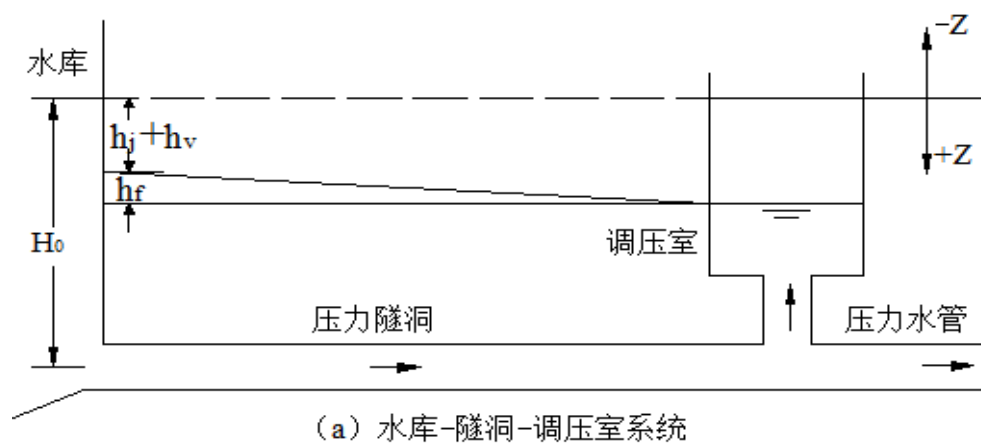


图 2-6 系统符号示意图
Fig 2-6 System schematic symbols

如图 2-6，在连接处可写出如下方程：

$$Q_t = Q_s + Q_{tur} \quad (2-96)$$

式中， Q_t ：为压力隧洞流量；

Q_p ：为压力管道流量（ $Q_p = Q_{tur}$ ， Q_{tur} 为机组引用流量）；

Q_s ：流入调压室的流量（以流入为正）， $Q_s = F \left(\frac{dz}{dt} \right)$ ；

F ：为调压室的面积。

所以连续方程可写为

$$\frac{dZ_s}{dt} = \frac{1}{F} (Q_t - Q_{tur}) \quad (2-97)$$

2.2.2 调压室涌波与管道水击的联合计算

调压室边界如图 2-9 所示。调压室底部通常用连接管与主管相连。调压室和连接竖管的长度与供水管道相比很短。其中的水体可视为集中质量^[48]。

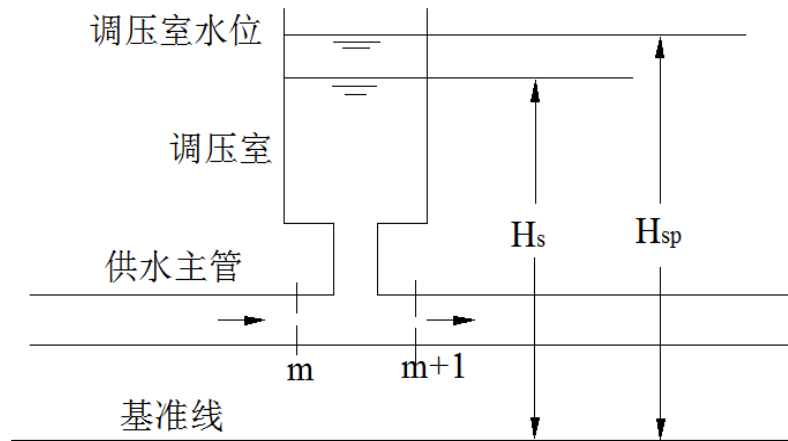


图2-9 调压室边界

Fig2-9 Surge boundary

正特征方程：

$$Q_{p_m} = C_m - C_a H_{p_m} \quad (2-98)$$

负特征方程：

$$Q_{p_{m+1}} = C_m + C_a H_{p_{m+1}} \quad (2-99)$$

连续方程：

$$Q_{p_m} = Q_{s_p} + Q_{p_{m+1}} \quad (2-100)$$

水头平衡方程：

$$H_{p_m} = H_{p_{m+1}} = H_{s_p} \quad (2-101)$$

水量平衡方程：

$$H_{s_p} = H_s + \frac{\Delta t}{2} \frac{Q_{s_p} + Q_s}{F_s} \quad (2-102)$$

上面所列的边界条件方程中， H 和 H_s 分别表示管道和调压室的水头，均以测压管水位与所取基准线之间的高度表示，下标 p 表示时段末的量。在推导水头平衡方程时通常不计水流进出调压室时的水头损失。 Q_s 和 Q_{s_p} 表示计算时段初始时刻和结束时进出调压室的流量（流入取正，反之取负）。联立上述五个方程，可求解所有未知量，即实现有压管道水击与调压室涌波的联合计算。

2.3 水轮发电机组过渡过程

2.3.1 水轮发电机组数学模型

求解机组过渡过程即求解不同工况下压力、转速等参数的瞬变过程。计算过程中要用到水轮机的全特性。机组数学模型由发电机动态特性、水轮机特性、导叶接力器关闭规律组成（通常认为大波动过渡过程与电力系统或者电气部分没有关联，因为当机组故障或事故使发电机油开关跳开、机组甩负荷时，调速器中的紧急停机电磁阀是联动的，此时调速器的自动控制部分被切除，控制导叶的接力器以整定的规律快速关闭。）。

2.3.1.1 发电机动态特性

$$M_t - M_g = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-103)$$

式中， M_t 、 M_g 、 J 分别为水轮机、发电机瞬时力矩和机组转动惯量，对于水电站瞬时丢弃全部负荷情况， $M_g = 0$ 。积分式（2-103），可得：

$$\omega_t - \omega_{t-\Delta t} = \frac{M_t + M_{t-\Delta t}}{2J} \Delta t \quad (2-104)$$

式中：机组角速度 $\omega = \frac{\pi n}{30}$ ， $J = \frac{GD^2}{4g}$ ； $\beta = \frac{n - n_0}{n_r}$ 机组转速升高相对值； $\bar{m} = \frac{M_t}{M_r}$ 力

矩相对值。代入式(2-104)，可得：

$$\beta_t = \beta_{t-\Delta t} + \frac{\bar{m}_t + \bar{m}_{t-\Delta t}}{2T_a} \Delta t \quad (2-105)$$

式中， $T_a = \frac{GD^2 n_r^2}{3580 P_r}$ 为机械惯性时间常数。起始时刻的 β 、 \bar{m} 已知，又有 $M_t = M'_1 D_1^3 H$ ，

所以求出 M'_1 ，即可求出 β_t 。

2.3.1.2 导叶关闭规律

进行大波动过渡过程计算时，导叶开度变化过程 $\alpha = \alpha(t)$ 通常以表格数据或拟合曲线形式给出，即进行计算时知道某一时间点的瞬时导叶开度。

$$\alpha = \alpha(t) \quad (2-106)$$

由前一时刻的 $\beta_{t-\Delta t}$ 、 $H_{t-\Delta t}$ ，根据式 $n_1' = nD/\sqrt{H}$ 可求得 n_1' ，根据 $M_1' = f(\alpha, n_1')$ 、 $Q_1' = f(\alpha, n_1')$ 可得到 M_1' 、 Q_1' ，然后利用 (2-105) 算出 β_t 。求出 t 时刻的 β_t 、 H_t 后，对于 $t+\Delta t$ 时刻，依照上述步骤计算即可，然后依次增加 Δt 完成整个迭代过程。

2.3.1.3 水轮机特性

由于水轮机的出力取决于机组的工作水头、流量、效率和转速，水轮机边界需按水轮机特性曲线进行模拟^[49]。水轮机流量和力矩可用下列式表示：

$$\begin{aligned} Q_1' &= f(\alpha, n_1') & Q &= Q_1' D_1^2 \sqrt{H} \\ M_1' &= f(\alpha, n_1') & M_t &= M_1' D_1^3 H \end{aligned}$$

2.4 基本边界条件

应用特征线法进行管道水击计算时，需要首先计算出各边界节点的状态，然后才能进行下一步的计算^[50]。即联立求解特征方程和边界方程。以下介绍基本边界方程和特殊边界方程的简化处理。

2.4.1 上游为恒定水位水库

库容较大时，上游水位在短时间内不会发生大的改变。进行计算时通常将其假设成恒定不变的。此假设的前提是：管道流速水头 $\frac{Q_p^2}{2gA^2}$ 和入口处摩阻损失 $\frac{\zeta Q_p^2}{2gA^2}$ 相对来说很小，可以不考虑。此时上游水库边界方程^[51]如下：

$$H_p = H_R - (1 \pm \zeta) \frac{Q_p^2}{2gA^2} \quad (2-107)$$

式中， H_R 为水库水头， ζ 为进口阻力水头损失系数（正向流动时系数前的符号取“+”）。

当管道流速水头和进口阻力水头损失较小而可以忽略时，恒定水位水库的边界方程可简化为：

$$H_p = H_R \quad (2-108)$$

2.4.2 下游端为阀门

系统处于恒定流状态时，阀门处流量公式：

$$Q_0 = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_0} \quad (2-109)$$

式中： C_d ：阀门阻力系数；

A_v ：阀门面积。

系统处于瞬变状态时，阀门处流量公式：

$$Q_p = (C_d A_v) \sqrt{2gH_p} \quad (2-110)$$

我们定义阀门的相对开度为

$$\tau = \frac{C_d A_v}{(C_d A_v)_0} \quad (2-111)$$

用式 (2-109) 除式 (2-110)，然后取平方，然后将式 (2-111) 代入。可得下式：

$$Q_p^2 = \frac{(Q_0 \tau)}{H_0} - H_p \quad (2-112)$$

以正特征方程 (2-80) 的 H_p 代入式 (2-112)。可得：

$$Q_p^2 + C_v Q_p - C_m C_v = 0 \quad (2-113)$$

式中： $C_v = \frac{(\tau Q_0)^2}{C_a H_0}$ 解式 (2-113) 并取正根得到

$$Q_p = 0.5 \left(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_m C_v} \right) \quad (2-114)$$

根据 (2-114) 可求得流进经阀门处的流量。将所求流量代入正特征方程 (2-80)，就能得到阀门处的水头 H_p 。导叶 $\alpha = \alpha(t)$ 通常以表格数据或拟合曲线形式给出，即进行计算时知道某一时间点的瞬时开度，阀门开度变化过程通常以表格数据或解析式形式给出。计算时通常也是以此来计算阀门开启或关闭的速度。

2.4.3 串联管

当管道系统中存在不同管径的管道时，两种不同管径管道连接处的边界，即为串联管边界。若两管在连接处的局部水头损失和流速水头无差别，对串联管 1 和 2 的接头处可写出下面的方程。

水头平衡方程：

$$H_{p1,n+1} = H_{p2,1} \quad (2-115)$$

流量连续方程：

$$Q_{p1,n+1} = Q_{p2,1} \quad (2-116)$$

第一个下标表示管道，第二个下标表示管道截面（下同）

正负特征方程：

对断面 (1, n+1) 和断面 (2, 1) 可写出如下正、负特征方程

$$Q_{p1,n+1} = C_{m1} - C_{a1} H_{p1,n+1} \quad (2-117)$$

$$Q_{p2,1} = C_{n2} + C_{a2} H_{p2,1} \quad (2-118)$$

联解式 (2-115) ~ (2-118) 可得

$$H_{p1,n+1} = \frac{C_{m1} - C_{n2}}{C_{a1} + C_{a2}} \quad (2-119)$$

其余三个未知量，可分别由式 (2-115) 和式 (2-117) 及式 (2-118) 求出。如果局部水头损失和流速水头差别较大，不能忽略，则接头处水头方程可写为：

$$H_{p1,n+1} + \frac{Q_{p1,n+1}(Q_{p1,n+1})}{2gA_1^2} = H_{p2,1} + (1 \pm \zeta) \frac{Q_{p2,1}(Q_{p2,1})}{2gA_2^2} \quad (2-120)$$

式中： ζ 为局部水头损失系数。当水流正向流动时，式中 ζ 取“+”。

联解式（2-116）至（2-118）和式（2-120）得到

$$Q_{p1,n+1} = B + \frac{\sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2-121)$$

式中，各常数分别为

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{2g} \left[\frac{1}{A_1^2} - \frac{1 \pm \zeta}{A_2^2} \right] \\ B &= \frac{1}{C_{a1}} + \frac{1}{C_{a2}} \\ C &= \frac{C_{m1}}{C_{a1}} + \frac{C_{m2}}{C_{a2}} \end{aligned} \right\} \quad (2-123)$$

其他未知量可由式（2-116）至式（2-118）确定。

2.4.4 分岔管

在对分岔列方程前，对其各管进行编号。主管与子管分别定义为 1~n。连接处水头损失及流速水头差值不考虑时，可写出以下方程。

连续方程：

$$Q_{p1,n+1} = Q_{p2,1} + Q_{p3,1} \quad (2-124)$$

特征方程：

$$Q_{p1,n+1} = C_{m1,n+1} - C_{a1}H_{p1,n+1} \quad (2-125)$$

$$Q_{p2,1} = C_{n2,1} + C_{a2}H_{p2,1} \quad (2-126)$$

$$Q_{p3,1} = C_{n3,1} + C_{a3}H_{p3,1} \quad (2-127)$$

水头平衡方程：

$$H_{p1,n+1} = H_{p2,1} = H_{p3,1} \quad (2-128)$$

$$H_{p1,n+1} = \frac{C_{m1,n+1} - C_{n2,1} - C_{n3,1}}{C_{a1} + C_{a2} + C_{a3}} \quad (2-129)$$

$H_{p2,1}$ 、 $H_{p3,1}$ 可由式（2-128）确定， $Q_{p1,n+1}$ 、 $Q_{p2,1}$ 、 $Q_{p3,1}$ 可由式（2-125）至（2-127）确定。

2.4.5 水轮机边界

在进行过渡过程仿真时，水轮机是作为一个边界来处理的，且其边界条件包含在水轮机特性中，因此关键是要获得水轮机特性。

如图 2-10。分别在蜗壳进口和尾水管出口取断面，建立机组边界条件。

2.4.5.1 水头平衡方程

$$H_p = H_{n_p} + H_T - \frac{Q_p^2}{2gA^2} \quad (2-130)$$

式中, H_p 、 H_{n_p} 、 Q_p 和 A 分别表示蜗壳进口的瞬时测压管水头、水轮机净水头、进入蜗壳的瞬时流量 (Q_p 等于水轮机引用流量 Q_{Tp}) 和蜗壳进口断面面积。 H_T 为尾水位据基准线以上的高度。

当尾水管的 $\sum L_v$ 占压力管道总的比例较小时, 通常将其计入压力管道的 $\sum L_v$ 中

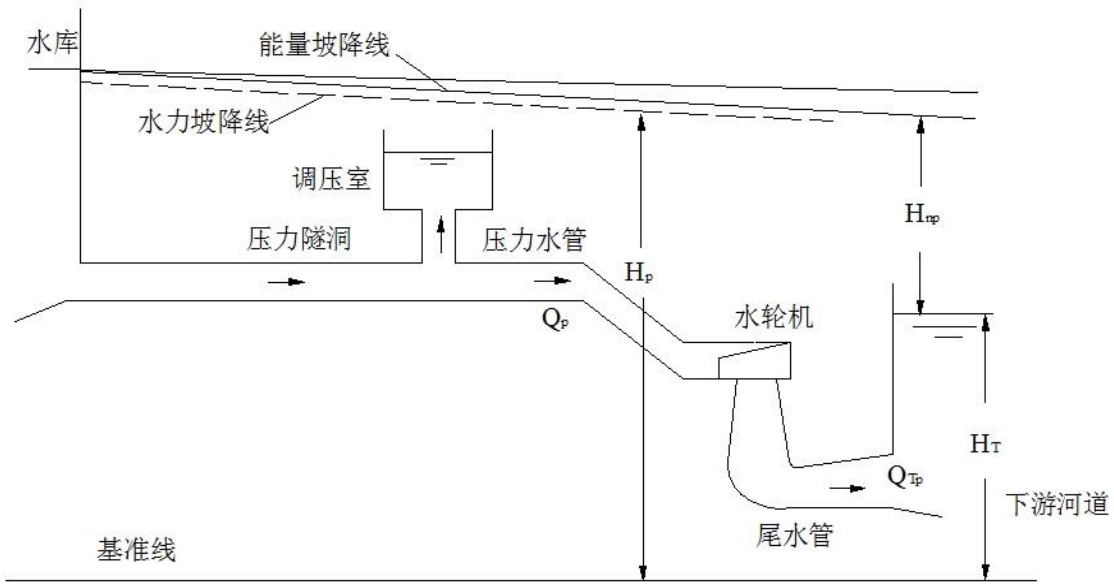


图2-10 有压引水系统

Fig 2-10 pressure diversion system

(即把机组当作置于管道末端) 或忽略不计。然后将有压管等效成当量管。对等效管末端应用正特征线方程:

$$C^+ : H_{pi} = C_p - B_p Q_{pi} \quad (2-131)$$

水轮机引用流量

$$Q_{pi} = Q'_1 D_1^2 \sqrt{H_{pi}} \quad (2-132)$$

求得 Q'_1 , 即可联立求解 Q_{pi} 、 H_{pi} 。

综上所述, 关键在于获得水轮机特性, 即可求得机组过渡过程中的各参数变化过程。

2.4.5.2 水轮机特性数据获取

水轮机工作状态与水轮机引用流量 Q 、工作水头 (净水头 H_n)、机组转速 N 和导叶开度 α 有关^[52]。对于转浆式水轮机, 其工作状态还和转轮叶片角度有关。工程上将静态模型实验所得的数据用多组曲线绘制在同一张图上来表示水轮机各参数间的关系, 即水

轮机模型综合特性曲线。

综合特性曲线中不同的点分别对应不同的工况。在该状态下运行时的工作参数可由图中算出。通常水轮机生产厂家仅给出正常运行时的工况区曲线。而对于包括小开度区、小单位转速区、制动工况区在内的全特性曲线提供较少。然而在进行电站水力过渡过程计算时恰恰需要知道这些工况区的特性^[52]。即需要求得水轮机的流量特性曲线 $Q_1' = f(\alpha, N_1')$ 及力矩特性曲线 $M_1' = f(\alpha, N_1')$ 供迭代计算时使用。

小开度区域的曲线一般由外推方法求得。小开度区域特性曲线的外推插补可利用水轮机出力关系或水轮机力矩关系进行插补^[53]。若利用机组出力关系，应知道水轮机转速为零时的流量，以及导叶开度小于空载开度时的风阻和摩阻损失。空载开度是指机组以同步转速运转，输出功率等于零时的最小导叶开度。利用出力关系插补误差较大，而利用力矩关系插补更容易且误差小，所以利用力矩关系进行电站水力过渡过程计算更为普遍。利用力矩关系插补，具体做法是利用外延法，依据已知的高效率区和飞逸特性曲线进行插补^[48]。依据飞逸特性曲线和零开度线对制动区外延插补时需要特别注意。此时，水轮机流量为零且所处状态与单位转速 n_1' 无关。

利用力矩关系进行插补时，通常将水轮机单位力矩 M_1' 表示为导叶开度 α 和单位转速 n_1' 的函数。三者可表示为如下关系式：

$$M_1' = f(\alpha, n_1') \quad (2-133)$$

单位力矩 M_1' 与水轮机效率 η 、单位流量 Q_1' 和单位转速 n_1' 的关系由下式确定

$$M_1' = 93604 \frac{\eta Q_1'}{n_1'} \quad (2-134)$$

式中： η 为效率， $Q_1' = f(\alpha, n_1')$ 和 n_1' 分别为单位流量和单位转速，高效率区力矩特性与流量特性可由综合特性转换得到，小开度区则可根据逸速特性曲线采用顺势延长的方法得到。

由上可得出水轮机的流量和力矩特性曲线。将获得的全特性数据以表格或表达式的形式（离散数据点的形式）存于数据文件中（具体做法是：在预先得到的全特性曲线上画出矩形网格，将网格上的 Q_1' 、 M_1' 、 n_1' 、 α 、 η 值输入计算机），建立数据文件。进行过渡过程计算时，采用插值的方式获取所需计算导叶开度上的流量特性与力矩特性数据，进行计算即可^[53]。

2.4 本章小结

本章首先对水击基本方程进行了推导，并介绍了水击基本方程的实用解法（特征线法）及其在求解有压管非恒定流中的应用。通过对电站引水发电系统的分析，建立了相关的边界条件。结合初始条件可实现有压管中两种非恒定流的联合计算。

3 调压室的设置及水力计算

调压室^[54]是水电站用来控制水力过渡过程、管道水击压力以及改善机组运行条件普遍采用的设施，且运行安全可靠，所以成为控制水电站水力过渡过程的主要工程措施。本节将介绍调压室的设置条件、调压室的型式及基本方程、调压室的涌波计算方法以及设有调压室的引水系统波动稳定性。

3.1 调压室的设置条件

设置调压室虽然有很多好处，但建造调压室投资相对过大。因此，应该事先对电站进行调保计算和运行条件分析。在此之上，与其它的技术方案对比后再决定是否要建造调压室。作为初步判断，上游调压室设置与否可按下面公式判别。

$$T_w > [T_w] \quad (3-1)$$

式中： $T_w = \frac{\sum L_i v_i}{g H_p}$ ， L_i 、 v_i 分别为压力管道、蜗壳及尾水管等各段长度（ m ）和

流速（ m/s ）； g 为重力加速度（ m/s^2 ）； H_p 为水电站设计水头（ m ）。 $[T_w]$ 为 T_w 的允许值，一般为 2~4s。对于孤立运行或容量占系统容量 50% 以上的水电站皆取最小值。

3.2 调压室基本布置方式及基本类型

1. 调压室的基本布置方式分三种，（1）水力系统设有上游调压室（2）水力系统设有下游调压室（3）水力系统上、下游同时设有调压室。

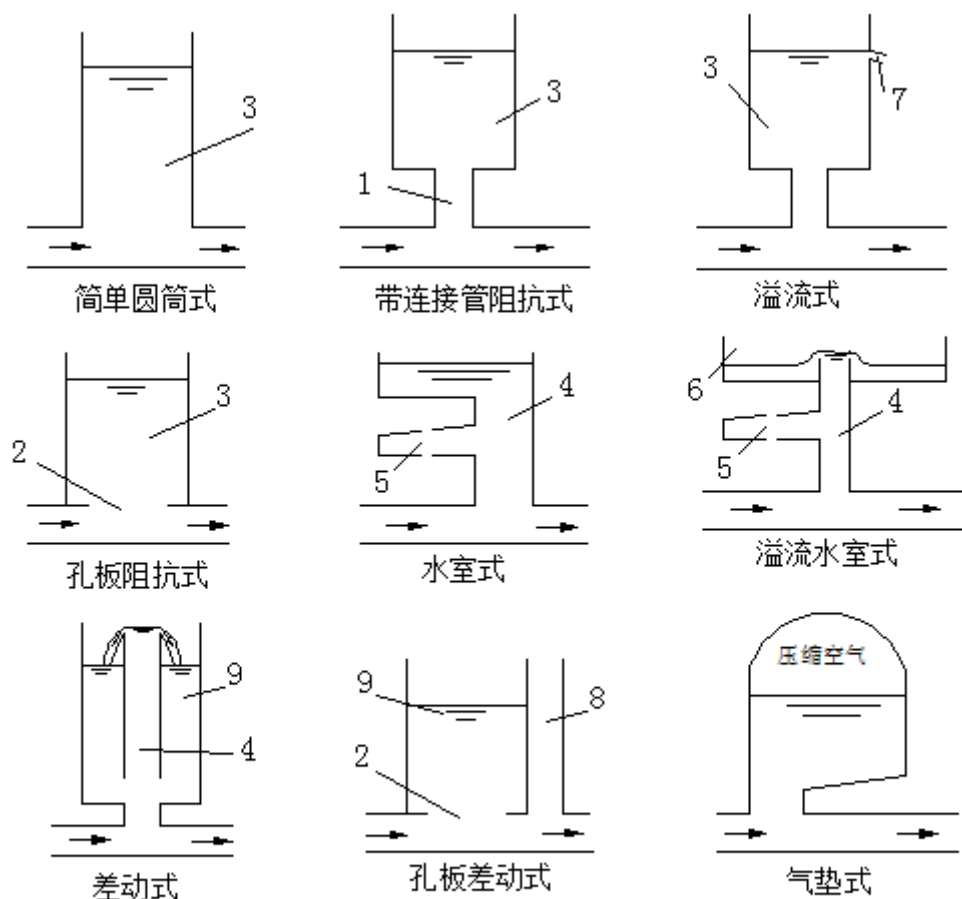
2. 调压室基本类型（如图 3-1）大致有以下几种，简单式；阻抗式；气垫式；水室式及差动式。

3.3 波动稳定性及稳定断面确定

在水库-隧洞-调压室系统中，由于阻力的存在，调压室水位波动不可能等幅的波动。若波动幅值随着时间逐渐减小，则波动是收敛的或稳定的。

3.3.1 稳定断面

弗兰克和希勒通过积分简单调压室波动方程，论证得出结论：在水轮机调节流量变化为等流量调节和等开度调节时，在计入隧洞阻力的情况下，波动总是稳定的。德国的托马对装有调速器的水电站调压室波动稳定问题进行研究，得出结论：当水电站按照等出力调节时，只有当横截面大于某一最小值时，调压室才是稳定的。以后我们称这个最小断面面积为托马断面^[56]。



1、连接管 2、阻抗孔 3、竖井 4、上室 5、下室 6、储水室
7、溢流堰 8、升管 9、大室

图 3-1 调压室的基本类型

Fig 3-1 The basic types of surge

波动衰减条件:

$$A > \frac{Lf}{2g\alpha H_1} \quad (3-2)$$

$A_{th} = \frac{Lf}{2g\alpha H_1}$ 为波动衰减的稳定断面。 L 为压力引水道长度， f 为压力引水道断面面积， H_1 为正常运行的最小水头值， α 为自水库至调压室水头损失系数，在无连接管时用 α 代替 $(\alpha + \frac{1}{2g})$ ；计算时，将所计算的 A_{th} 乘以一个安全系数作为调压室的最终断面 $A_s = kA_{th}$ ，一般系数 $k = 1.0 \sim 1.1$ 。

由 $p^2 > 0$ ，得到

$$h_{w0} + h_{wn0} > \frac{1}{3} H_0 \quad (3-3)$$

上式表明，为保证波动的衰减，引水隧洞的水头损失和压力管道的水头损失之和必须大于水电站静水头 H_0 的三分之一。由于经济上的原因，引水系统的水头损失占水电

站总水头的比例通常较小，因此该条件一般总可以满足。

公式 $A_{th} = \frac{Lf}{2g\alpha H_1}$ 是基于如下条件推导而来的：（1）波动无限小；（2）电站孤立运行；（3）调速器严格按照保持出力不变；（4）忽略水轮机效率变化。这些假定条件都带有近似性。当波动不是无限小时，此时运动方程呈现出非线性。对此，目前还没有严格的理论解答。

3.3.2 调压室大波动稳定性

由于水库-调压室系统大波动的微分方程是非线性的，分析大波动稳定性不能再线性化，这使得在数学分析上遇到较大的困难。耶格尔推导出如下非线性微分方程：

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \varphi\left(\frac{dX}{dt}, X\right) \frac{dX}{dt} + \psi(X)X = 0 \quad (3-4)$$

将非线性方程系数 $\varphi\left(\frac{dX}{dt}, X\right)$ 和 $\psi(X)$ 对 t 积分，并取 $t = \frac{T}{2}$ （ T 为波动周期）内的平均值，得出了调压室大波动的如下稳定断面公式：

$$A = nA_{th} \quad (3-5)$$

式中， A_{th} 为托马断面， $n = \left(1 + 0.482 \frac{Z_0}{H_0}\right)$ ， $Z_0 = V_0 \sqrt{\frac{Lf}{gF}}$ 。

可见，式（3-5）是在一定假设条件下导出的，并且忽略了水轮机效率的影响。研究大波动稳定时，考虑水轮机效率影响比研究小波动稳定更重要。伊凡格里斯特和马瑞斯等人研究调压室大波动时给出结论大波动稳定对调压室断面要求更高^[50]。

调压室大波动稳定分析的有效方法是逐步积分方法，它易于考虑必要的因素条件，利用计算机进行分析也很方便。将包括调压室在内的水电站引水发电系统的基本方程和机组调速方程（含调速器）写成差分形式逐步进行水力过渡过程计算。能够同时得出调压室水位波动、水击压力变化和机组转速变化过程。波动是否稳定以及衰减或发散的情况，从得出的水位波动过程中我们就能够看出。

3.3.3 调压室稳定断面选择

对于设有调压室的电站，波动稳定在本质上是因为调速器调节引起的。托马假定调速器能够刚性的保持水轮机出力为一个常数。但这个假定与实际的水轮机调节过程并不相符。由于水轮机和调速器的惯性以及水击压力的影响，当负荷变化时，调速器的动作不可能瞬时完成，存在一个滞后时间且有一个完成过程。研究证明，对于稳定性影响最大的往往是调速器参数。即配压阀时间常数和暂态转差系数，一般来说，增大这两个参数有助于系统稳定，即在适当减小稳定断面的情况下，亦可以保持稳定。但同时带来的结果是调速器的灵敏性降低，从而影响到供电质量，这对于重要的且担任系统调频任务的电站影响较大。对于参加系统运行的电站，调压室则更加容易保持波动稳定。

综上所述，稳定断面可以按如下原则选择^[50]：

(1) 水电站在系统中所占比重较大且担任系统调频任务时，采用托马断面或略大于托马断面，安全系数取为 1.0~1.5。

(2) 水电站虽在系统中占一定比重，但不承担调频任务。当电站水头很低时，适当改动调速器参数也能使断面得到减小。

(3) 中小型电站可适当降低稳定性要求，采用（2）的方法选择断面。

3.4 本章小结

本章首先介绍了调压室的设置条件和基本类型，然后对波动方程进行了推导，并对波动方程进行处理给出其差分形式，利用所得的方程进行迭代可实现调压室涌浪的独立计算。最后对波动稳定性及稳定断面的选择进行了讨论，给出确定稳定断面的依据。

4 水电站水力过渡过程仿真与分析

电站运行过程中, 机组因各种状况而突甩负荷的情况时常发生。此时, 导叶按给定规律自动关闭。伴随产生水击压力和机组转速升高现象。当导叶关闭过慢时, 此时虽能保证压力升高满足要求, 但此时机组转速升高过大, 机组及辅助设备的可靠性无法保证。当导叶关闭过快时, 可能导致系统压力升高超过规范要求, 严重的可能引发压力钢管的爆裂, 从而造成安全事故。工程实践中曾发生因水击压力过大而造成压力管道爆裂的事故。所以, 在设计规划阶段, 应做好过渡过程中转速及压力升高的计算工作。

4.1 工程概况

某水利枢纽主要建筑物由坝体, 坝身泄洪表孔、泄洪底孔、引水发电建筑物组成^{[57][58]}。在左岸距坝轴 650m 处布进水口。进水口顶部高程 515.0, 底坎高程 474.0m, 进口洞顶高程 480m。

最大坝高 100m。总库容 1.47 亿 m^3 , 调节库容 0.875 亿 m^3 , 为不完全水库。水库正常蓄水位为 512.0m, 设计洪水位 511.10m, 校核洪水位 512.50m, 死水为 485.0 m。

有压引水系统总长 2940m, 设计流量 93.0 m^3/s 。额定水头 90.0m, 最大工作水头 102.10m, 最小工作水头 71.2m, 加权平均水头 97 m。

压力引水隧洞长 2715.21m, 洞口管径 6 m, 设计底坡为 5‰。调压室初选阻抗式, 大室竖井的设计断面直径 14m, 阻抗孔直径 2.9m, 底板高程 469.52m, 竖井顶部地面高程 532.0m, 竖井高 69.39m。调压室后接压力钢衬埋管, 钢衬埋管管径 5.5m, 主管长 134.28m。主管在进入主厂房 102m 前分岔为三根支管, 然后接入厂房, 支管管径 3m。引水发电系统如图 4-1 所示。

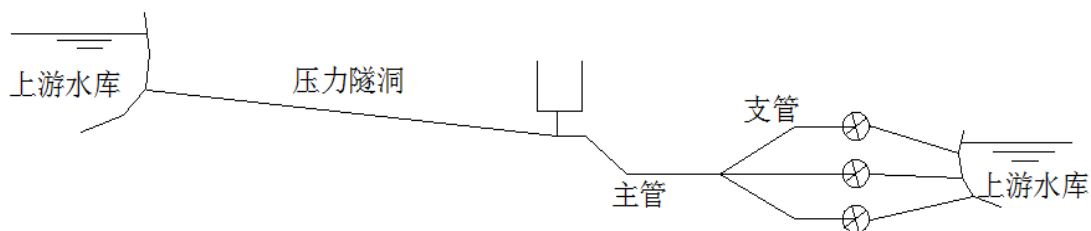


图 4-1 引水发电系统示意图

Fig 5-1 The sketch map of water diversion and power generation system

下游水位: 最大引用流量水位 408.9m, 校核洪水尾水位 414.4m ($Q=32.9 \text{ m}^3/\text{s}$), 设计洪水尾水位 414.1m ($Q=30.4 \text{ m}^3/\text{s}$), 正常尾水位 408.5m ($Q=31.0 \text{ m}^3/\text{s}$), 最低尾水位 408.2m。

电站装机容量 7.2 万 kW (3 台 2.4 万 kW 的机组), 保证出力 1.17 万 kW, 年平均

利用 3100h, 多年平均发电量 2.23 亿 kW·h。

水轮机型号为 HL(A384)-LJ-180, 转轮直径 1.8m, 额定出力 2.54 万 kW, 额定流量 $31\text{ m}^3/\text{s}$, 额定转速 428.6 r/min, 吸出高度 -3.18m, 安装高程 405m, 蜗壳进口直径 2.5m, 蜗壳包角 345° 。

发电机型号为 SF24-14/3900, 额定转速 428.6 r/min, 额定容量 2.82 万 kVA, 额定电压 10.5kV, 额定电流 1553A, 转动惯量 $270\text{ t}\cdot\text{m}^2$ 。

4.2 水电站过渡过程计算方法

在水电站引水发电系统中, 当运行工况发生变化时, 从上游水库到下游尾水河渠中的水流、运行中的水力机械、电气设备乃至整个电力系统都将处于过渡过程中, 而且它们之间相互联系、相互影响。通常, 当机组故障或事故使发电机油开关跳开、机组甩负荷时, 调速器中的紧急停机电磁阀是联动的, 此时调速器的自动控制部分被切除, 控制导叶的接力器以整定的规律快速关闭。所以, 大波动过渡过程是水力与机械联合的过渡过程。因此, 研究水力瞬变涉及大量的非线性复杂问题

从过渡过程的研究进程我们可以知道, 过渡过程计算在计算机出现之前, 都是由计算者手算出来的 (如解析法和图解法)。

解析法是在对过渡过程中水轮机组各主要相关因素内在关系的研究基础之上, 求得各主要工况参数的解析表达式, 用以研究过渡过程中各参数的变化规律。该方法计算简单且可以明确的反映各内在因素间的关系, 但上面提到过渡过程中影响因素较多且涉及大量的非线性问题, 所以在推导解析式时通常要做一定的假设, 将某些非线性因素进行线性化处理。导致的结果是用该解析式进行计算所得的结果往往与实际情况存在较大误差, 所以在做定量分析时一般不建议采用这种方法。

图解法是根据已知的工况参数解析表达式, 针对待求参数, 在给定初始条件和边界条件下, 利用作图法予以确认。这种方法的缺点是手工作图的过程繁琐, 且作图过程中易出现误差。

随着科学技术的发展, 计算机开始应用于水电站复杂问题的求解。基于数值计算方法, 利用软件编程对过渡过程进行仿真计算越来越多的被研究设计人员采用。相较于传统的手算模式, 电算仿真通用性强, 计算结果更加准确、计算效率也大大提高。但应用传统的语言编程会遇到诸多不便, Matlab 语言很好的解决了这些问题, 为控制系统的分析设计发展起到了关键性作用。

4.2.1 MATLAB 简介

1984 年, MathWorks 公司成立, 专门从事 Matlab 软件的开发, 并把 Matlab 正式推向市场。目前已成为国际最流行的科学与工程计算软件之一。它以模块化的计算方法、可视化与智能化的人机交互功能、丰富的矩阵运算、图形绘制和数据处理函数, 以及模块化图形的动态系统仿真工具 Simulink, 成为控制系统设计和仿真领域最受欢迎的软件

系统。

(1) Matlab 应用: Matlab 是一个高精度的科学计算语言, 将计算、可视化、和编程结合在一个容易使用的环境中, 典型应用包括: (1) 数学计算 (2) 运算法则 (3) 建模和仿真 (4) 数据分析、研究和可视化 (5) 工程图形处理 (6) 应用程序开发, 包括创建图形用户接口。

(2) Matlab 语言特性: 1、除了具有强大数值计算和图形功能以外, 还拥有解决特定应用问题的工具箱。2、是一个高级的矩阵/数组编程语言, 其基本数据单元是数组且大小不要求固定。所以在许多包含矩阵和大量运算的问题上应用较方便。3、指令表达与数学、工程的习惯相似, 且较传统高级语言语法 (C、Fortran) 规则更简单, 表达更符合工程习惯。4、计算精度较高, 矩阵类运算可达 10^{-15} 数量级, 且不会出现坏条件问题, 即计算结果是可靠稳定的。5、具有较强的开放性, 各源程序是可修改的, 便于自主扩展功能。6、基于图形模块的 Simulink 动态仿真功能。7、智能的图形处理系统, 包括数据可视化、图像处理等高级命令。

4.2.2 MATLAB 在水电站过渡过程计算中的应用

在进行水电站水力过渡过程仿真计算时, 用到的方法通常有两种: 一是建立在对水电站过渡过程研究的基本理论及其相应的数学模型之上, 基于 Matlab 的矩阵计算功能, 通过编制程序, 实现水力过渡过程的仿真; 二是基于传递函数的模块组态方法, 即利用 Simulink 提供的模块按实际物理系统相互连接起来, 构成系统模型。根据给定的初始条件, 即可获得所需结果。

本文即通过编制相应的电算程序实现水力过渡过程的仿真。主要程序框图及水轮机子程序框图如图 4-2、4-3 所示。该方法的优点: 可靠且计算精度较高。且还可将程序编制成积木式软件包, 以便于针对不同电站 (水电站布置方式、结构形式通常不同) 构成的系统模型。

主程序框架图：

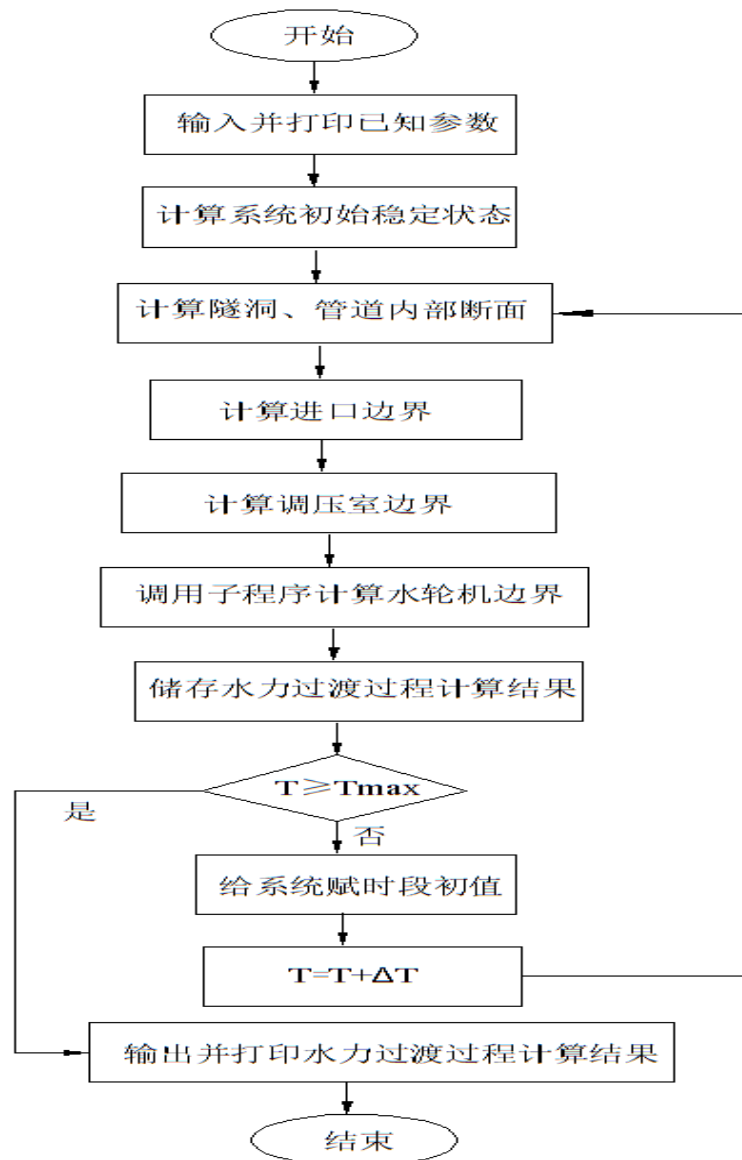


图4-2 主程序框图

Fig 4-1 Block diagram of main program

水轮机子程序：

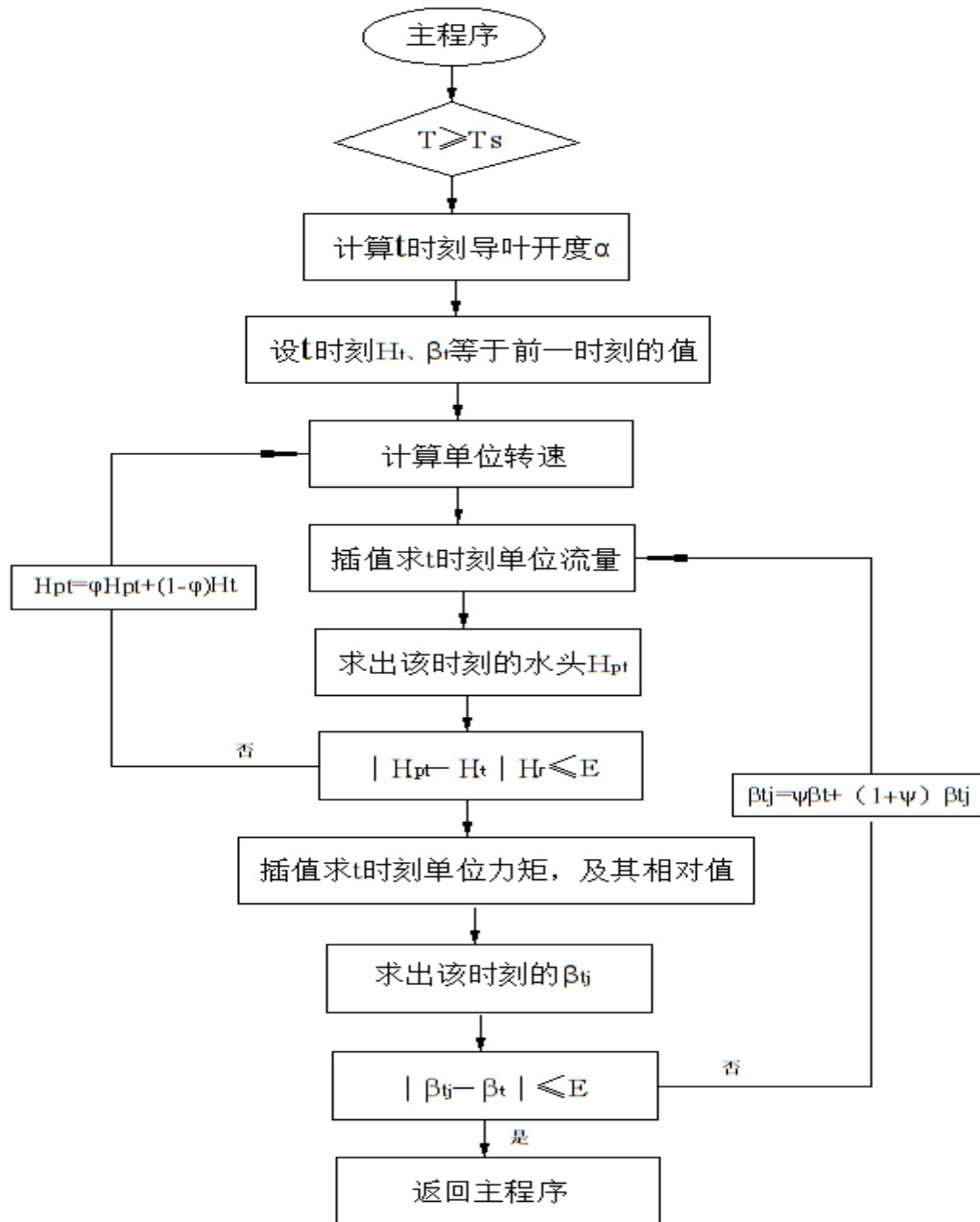


图4-3水轮机子程序框图

Fig 4-2 Block diagram of turbine program

4.3 数据处理

将全特性数据以表格的形式储存在计算机里，建立数据文件。进行过渡过程计算时，采用插值的方式获取所需导叶开度上的数据（为保证插值的精度。插值前对各开度下的流量及力矩特性曲线进行网格细化，然后进行二维三次插值，最后利用 Matlab 中绘制等高线的函数命令得出任意开度下的流量及力矩特性曲线^[61]）。根据第二章所述求得流量与力矩特性，如表 4-1、4-2 所示。

表 4-1 流量特性(m^3/s)
Tabel 4-1 Flow characteristics(m^3/s)

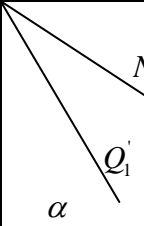
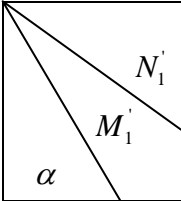
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.061	0.060	0.060	0.059	0.059	0.057	0.057	0.056	0.056	0.054	0.054
4	0.112	0.109	0.109	0.108	0.107	0.104	0.103	0.100	0.099	0.098	0.097
6	0.184	0.180	0.180	0.178	0.177	0.172	0.171	0.167	0.165	0.163	0.162
8	0.233	0.229	0.229	0.226	0.224	0.219	0.216	0.212	0.208	0.206	0.204
10	0.305	0.300	0.300	0.296	0.294	0.287	0.284	0.279	0.274	0.271	0.269
12	0.355	0.349	0.348	0.354	0.341	0.334	0.329	0.323	0.317	0.315	0.311
14	0.427	0.420	0.419	0.415	0.411	0.402	0.397	0.39	0.383	0.380	0.376
16	0.477	0.472	0.470	0.467	0.463	0.449	0.442	0.435	0.430	0.427	0.423
18	0.549	0.545	0.543	0.54	0.536	0.518	0.509	0.501	0.499	0.495	0.491
20	0.594	0.592	0.589	0.581	0.575	0.561	0.554	0.546	0.541	0.532	0.528
22	0.661	0.660	0.656	0.643	0.636	0.625	0.621	0.612	0.604	0.590	0.586
24	0.695	0.692	0.688	0.678	0.673	0.662	0.659	0.652	0.646	0.629	0.620
26	0.751	0.745	0.741	0.735	0.731	0.720	0.719	0.714	0.710	0.690	0.676
28	0.77	0.769	0.770	0.764	0.76	0.755	0.752	0.747	0.74	0.734	0.730
30	0.821	0.818	0.817	0.815	0.816	0.813	0.806	0.795	0.791	0.790	0.795
32	0.845	0.844	0.840	0.839	0.838	0.835	0.834	0.829	0.825	0.819	0.825
34	0.883	0.883	0.883	0.88	0.879	0.877	0.878	0.876	0.876	0.875	0.875
36	0.899	0.898	0.899	0.897	0.898	0.897	0.899	0.898	0.9	0.902	0.902
38	0.936	0.935	0.936	0.936	0.939	0.94	0.942	0.942	0.946	0.95	0.951
40	0.942	0.942	0.946	0.947	0.952	0.954	0.961	0.963	0.968	0.971	0.971
42	0.969	0.97	0.977	0.98	0.986	0.99	0.101	1.005	1.011	1.013	1.012
44	0.973	0.979	0.985	0.988	0.993	0.997	1.005	1.009	1.015	1.021	1.021
46	0.999	1.01	1.013	1.018	1.022	1.026	1.031	1.035	1.041	1.05	1.051

表 4-2 力矩特性($N \cdot m$)Tabel 4-2 Torque characteristics($N \cdot m$)

	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0	-507	-572	-552	-467	-419	-347	-259	-189	-197	-118	-140
2	-342	-406	-496	-330	-396	-240	-172	-118	-133	-65	-96
4	-175	-238	-239	-215	-171	-131	-82	-44	-67	-11	-49
6	-10	-72	-84	-53	-47	-24	-5	-5	-3	-20	-4
8	157	95	74	86	78	85	895	100	64	97	42
10	323	261	229	23	201	191	182	172	128	149	87
12	490	429	387	362	327	300	271	245	194	204	134
14	655	594	542	499	450	407	359	316	259	256	178
16	764	709	651	598	538	479	420	372	313	295	235
18	871	821	757	696	625	548	479	425	366	331	290
20	969	919	850	777	701	623	549	486	418	369	320
22	1066	1014	941	857	776	695	616	544	468	406	348
24	1143	1081	1003	921	840	760	679	505	525	451	381
26	1217	1146	1062	984	902	823	740	665	580	494	413
28	1258	1193	1116	1032	951	881	795	713	625	545	467
30	1207	1235	1149	1075	999	931	843	756	663	582	407
32	1339	1265	1184	1108	1031	960	910	809	709	618	537
34	1356	1287	1204	1127	1046	979	904	840	744	598	558
36	1363	1296	1213	1142	1063	994	919	854	771	658	591
38	1368	1302	1220	1156	1078	1007	932	866	796	716	622
40	1370	1296	1221	1155	1080	1011	948	871	802	732	643
42	1369	1287	1219	1153	1079	1013	963	873	805	746	662
44	1363	1287	1213	1153	1078	1011	940	863	792	732	651
46	1355	1285	1204	1150	1074	1006	916	850	777	716	638

4.4 计算准则

文献^[59]中关于调节保证计算的规定：

(1) 机组甩负荷的最大转速升高率：机组容量占电力系统运行容量比重较大且承担调频任务时，宜小于 0.45；机组容量占电力系统运行容量比重不大或担负基荷时，宜小于 0.55。

(2) 机组甩负荷时蜗壳最大压力升高率：

$$H < 40\text{m} \quad \zeta = 0.7 \sim 0$$

$$H = 40 \sim 100 \quad \zeta = 0.5 \sim 0$$

$$H > 100 \quad \zeta < 0.5$$

H 为额定水头，低水头时 ζ 取大值。

结合电站实际情况可确定如下控制条件：机组甩负荷时蜗壳末端允许最大压力升高相对值 $\zeta_{\max} < 0.5$ ；机组最大转速上升率 $\beta_{\max} < 0.55$ 。

文献^[60]中关于调压室水力计算的要求：

调压室最高涌浪水位以上的安全超高不小于 1m，上游调压室最低涌浪水位与压力引水道顶部间的安全高度不小于 2~3m，调压室底板处安全水深不小于 1m。

4.4 仿真计算

4.4.1 计算任务

结合上述规范。初步拟定如下计算任务：

(1) 优化确定导叶关闭时间；进行机组调节保证及大波动过渡过程计算，在优化导叶关闭时间的基础上，求得各工况下的蜗壳末端最大压力上升、机组最大转速上升，以及相应的过渡过程曲线；

(2) 对调压室进行水力计算，确定各工况下调压室的最高、最低涌浪水位，优化选定满足规范要求的调压室断面尺寸；

4.4.2 计算工况

基于上述计算任务，初步拟定以下工况进行计算：

(1) 工况 1：额定水头，三台机同时丢弃全部负荷；

(2) 上游调压室最高涌浪水位计算工况（工况 2）：按上游水库校核洪水位时，引水道的粗糙率取小值，共用同一调压室的三台机组满载运行时瞬时丢弃全部负荷。

(3) 上游调压室最低涌浪水位计算工况（工况 3）：上游水库死水为时，引水道的粗糙率取大值，共用同一调压室的三台机组，两台机运行，一台机增加全部负荷。

4.4.3 计算结果分析

当导叶关闭过快时，可能导致系统压力升高超过规范要求，严重的可能引发压力钢管的爆裂，从而造成安全事故^[62]。当水头较高时，该状况尤其严重。当导叶关闭过慢时，

此时虽能保证压力升高满足要求,但此时机组转速升高过大,机组及辅助设备的可靠性无法保证。所以,导叶如何关闭才能满足电站的压力及转速升高要求是水电站水力瞬变计算的研究重点。同时,相较于其它工程控制方案,对 T_s 进行优化更为经济。所以成为解决调保计算问题的首选手段。依据上述原则,分别取 T_s 为6s、7s、8s时进行试算。计算结果如表4-3~4-7所示。

在调压室中设置阻抗孔的作用^[32]在于,设置阻抗孔后可以进一步缓解有压引水道受力及减小调压室涌波的波动幅度。同时可使调压室涌波快速衰减。对于阻抗孔断面尺寸的选择,其与引水隧洞断面有密切关系。当两者比值在15%~50%时,阻抗孔才能发挥上述作用。比值偏低时,引水管道受力出现恶化。当比值偏大时,又不能有效减小波动幅度及加速波动衰减。在长有压引水系统中这种现象更为明显。根据上述分析,分别取对应比值在25%附近的六个阻抗孔直径(2.83m、2.89m、2.95m、3.01m、3.07m、3.13m)进行计算(调压室大室直径分别取12m、14m、16m)。计算结果如表5-3~5-8所示。

1、关闭时间取6s时,工况1和工况2对应的机组转速上升和蜗壳末端压力上升、调压室涌浪水位和隧洞末端压力升高。

表4-3 $T_s=6s$ 时,调压室尺寸优化计算结果

Tabel 4-3 $T_s=6s$,the calculation results of the optimization of surge chamber

调压室直径 D (m)	阻抗孔直径 d (m)	机组转速上升(%)		蜗壳末端压力升高(%)	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
12	2.83	47.91	47.83	40.8	59.2
	2.89	47.82	47.73	39.3	56.8
	2.95	47.75	47.66	38.1	54.9
	3.01	47.69	47.61	37.1	53.2
	3.07	47.64	47.56	36.1	51.7
	3.13	47.59	47.52	35.2	50.3
14	2.83	47.87	47.79	40.3	58.5
	2.89	47.79	47.70	38.8	55.3
	2.95	47.72	47.63	37.6	54.2
	3.01	47.67	47.58	36.6	52.6
	3.07	47.61	47.54	35.6	51.1
	3.13	47.56	47.50	34.7	49.7
16	2.83	47.85	47.77	40.0	58.10
	2.89	47.77	47.68	38.5	55.7
	2.95	47.71	47.62	37.3	53.8
	3.01	47.65	47.57	36.3	52.2
	3.07	47.59	47.52	35.3	50.6
	3.13	47.54	47.48	34.4	49.2

表 4-4 $T_s=6s$ 时, 调压室尺寸优化计算结果

Tabel 4-4 $T_s=6s$, the calculation results of the optimization of surge chamber

调压室 直径 D(m)	阻抗孔 直径 d(m)	调压室最高涌浪水位 (m)		调压室最低涌浪水位 (m)		隧洞末端压力上升 (%)	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
12	2.83	516.3	528.3	490.7	504.1	77.4	44.1
	2.89	516.8	528.7	490.2	503.7	71.5	41.6
	2.95	517.2	529.1	489.8	503.3	66.9	42.4
	3.01	517.6	529.4	489.3	502.9	67.4	43.2
	3.07	518	529.8	488.9	502.5	68.6	43.9
	3.13	518.3	530.1	518.3	502.1	69.7	44.5
14	2.83	512.9	525.2	492.9	506.2	75.8	43.1
	2.89	513.3	525.6	492.4	505.8	69.9	39.8
	2.95	513.7	525.9	492	505.4	65.3	37.2
	3.01	514.1	526.3	491.7	505.1	61.1	36.2
	3.07	514.4	526.5	491.4	504.8	57.5	36.9
	3.13	515.7	526.8	514.7	504.5	58.6	37.5
16	2.83	510.4	523	494.3	507.6	74.8	42.4
	2.89	510.8	523.3	494	507.2	68.9	39.1
	2.95	511.1	523.6	493.7	507	64.3	36.5
	3.01	511.5	524.2	493.4	506.7	60.0	34.2
	3.07	511.8	524.2	493.1	506.4	56.2	32.0
	3.13	512.1	524.4	512.1	506.2	52.6	32.3

2、关闭时间取 7s 时, 工况 1 和工况 2 对应的机组转速上升和蜗壳末端压力上升、调压室涌浪水位和隧洞末端压力升高。

表 4-5 $T_s=7s$ 时, 调压室尺寸优化计算结果

Tabel 4-5 $T_s=7s$, the calculation results of the optimization of surge chamber

调压室直径 D(m)	阻抗孔直径 d(m)	机组转速上升(%)		蜗壳末端压力升高(%)	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
12	2.83	51.55	51.41	38.5	55.3
	2.89	51.45	51.34	37.0	53.1
	2.95	51.37	51.29	35.8	51.4
	3.01	51.31	51.24	34.7	49.8
	3.07	51.24	51.20	33.8	48.5
	3.13	51.19	51.17	32.9	46.9
14	2.83	51.51	51.38	37.9	54.4
	2.89	51.41	51.31	36.4	52.4
	2.95	51.37	51.26	35.2	50.6
	3.01	51.27	51.22	34.2	49.0

16	3.07	51.21	51.18	33.2	47.5
	3.13	51.15	51.14	32.3	46.2
	2.83	51.49	51.36	37.6	54.2
	2.89	51.39	51.3	36.0	51.9
	2.95	51.31	51.25	34.9	50.1
	3.01	51.24	51.20	33.8	48.5
	3.07	51.18	51.16	32.8	47.1
	3.13	51.12	51.12	31.9	45.7

表 4-6 $T_s=7s$ 时, 调压室尺寸优化计算结果Tabel 4-6 $T_s=7s$, the calculation results of the optimization of surge chamber

调压室直径 D(m)	阻抗孔直径(m)	调压室最高涌浪水位 (m)		调压室最低涌浪水位 (m)		隧洞末端压力上升 (m)	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
12	2.83	516.3	528.3	490.7	504.1	76.8	43.9
	2.89	516.8	528.8	490.2	503.7	71.1	41.7
	2.95	517.2	529.1	489.7	503.3	66.7	42.5
	3.01	517.2	529.2	491.6	505	67.5	43.2
	3.07	517.7	529.7	491.1	504.6	68.7	43.9
	3.13	518.1	530	490.6	504.2	69.8	44.6
14	2.83	518.5	530.4	490.2	503.8	75.0	42.7
	2.89	518.9	530.7	489.8	503.4	69.3	39.5
	2.95	519.3	531	489.4	503.0	64.8	37.0
	3.01	513.8	526.1	493.8	507.1	60.7	36.3
	3.07	514.3	526.5	493.3	506.7	57.6	36.9
	3.13	514.6	526.9	493.0	506.3	58.6	37.5
16	2.83	515.0	527.2	492.6	506.0	73.8	41.9
	2.89	515.3	527.5	492.3	505.7	68.1	38.7
	2.95	515.7	527.7	491.9	505.4	63.6	36.2
	3.01	511.3	523.9	496.0	508.5	59.5	33.9
	3.07	511.7	524.2	495.7	508.1	55.8	31.8
	3.13	512.1	524.5	495.4	507.9	56.3	32.3

3、关闭时间取 8s 时, 工况 1 和工况 2 对应的机组转速上升和蜗壳末端压力上升、调压室涌浪水位和隧洞末端压力升高。

表 4-7 $T_s=8s$ 时, 调压室尺寸优化计算结果Tabel 4-7 $T_s=8s$, the calculation results of the optimization of surge chamber

调压室直径 D(m)	阻抗孔直径 d(m)	机组转速上升(%)		蜗壳末端压力升高(%)	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
	2.83	54.84	54.64	36.1	49.7
	2.89	54.72	54.56	34.7	48.5

12	2.95	54.64	54.51	33.5	46.4
	3.01	54.56	54.45	32.5	45.6
	3.07	54.49	54.41	31.5	43.7
	3.13	54.42	54.36	30.6	41.4
14	2.83	54.74	54.6	35.5	49.8
	2.89	54.67	54.53	34.1	47.6
	2.95	54.59	54.47	32.9	45.9
	3.01	54.51	54.42	31.8	44.3
	3.07	54.44	54.37	30.8	42.9
	3.13	54.37	54.33	30.1	41.6
16	2.83	54.75	54.58	35.1	49.2
	2.89	54.64	54.51	33.6	47.1
	2.95	54.56	54.45	32.4	45.3
	3.01	54.48	54.4	31.4	43.8
	3.07	54.43	54.35	30.4	42.4
	3.13	54.34	54.31	29.5	41.0

表 4-8 $T_s=8s$ 时, 调压室尺寸优化计算结果

Tabel 4-8 $T_s=8s$,the calculation results of the optimization of surge chamber

调压室直径 D(m)	阻抗孔直径 d(m)	调压室最高涌浪水位 (m)		调压室最低涌浪水位 (m)		隧洞末端压力上升 (m)	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
12	2.83	516.3	528.4	490.7	504.1	76.2	36.1
	2.89	516.9	528.8	490.2	503.6	70.7	34.7
	2.95	517.3	529.2	489.7	503.2	66.5	33.5
	3.01	517.7	529.8	489.3	502.8	67.7	32.5
	3.07	518.0	529.8	488.9	502.5	68.8	31.5
	3.13	518.4	530.1	488.5	502.1	69.9	30.6
14	2.83	512.9	525.1	492.8	506.2	74.1	35.5
	2.89	513.4	525.8	492.4	505.8	68.6	34.0
	2.95	513.8	526.0	492.1	505.4	64.3	32.9
	3.01	514.1	526.6	491.7	505.1	60.4	31.8
	3.07	514.5	526.6	491.3	504.8	57.7	30.8
	3.13	514.8	526.9	491.0	504.5	58.7	30.0
16	2.83	510.5	523.0	494.3	507.6	72.8	35.1
	2.89	510.9	523.4	494.0	507.2	67.3	33.6
	2.95	510.3	523.7	493.7	507.0	63.0	32.4
	3.01	511.5	524.0	493.4	506.7	59.0	31.4
	3.07	511.8	524.2	493.1	506.4	55.3	30.4
	3.13	512.1	524.5	492.8	506.1	52.0	29.5

仿真结果分析

如表 4-3、4-5、4-7 所示, 导叶关闭时间相同时工况 1 的转速上升均大于工况 2,

工程上也通常将工况 1 作为控制机组转速最大上升的一般情况；当导叶关闭时间为 6s 时。由表 4-3 可知，工况 2 计算所得的蜗壳末端压力上升均超过或接近规范值，所以导叶关闭时间为 6s 时关闭时间偏小；当导叶关闭时间为 8s 时。由表 4-7 可看出此时机组转速上升均与规范近似，所以导叶关闭时间为 8s 时关闭时间偏大。初选导叶关闭时间 $T_s=7s$ 。

对于调压室的尺寸。由前面所述，尺寸合适的阻抗孔直径对于减小压力管道受力及加速调压室涌浪的衰减和减小涌浪幅度有重要作用。对表 4-5、4-6 进行分析，可看出当阻抗孔直径取 2.83m、2.89m、2.95m 时蜗壳末端压力均大于规范值。当阻抗孔直径取 3.01m、3.07m、3.13m 时蜗壳末端压力及机组转速上升符合规范要求，由表 4-6 可见，当阻抗孔直径取 3.13m 时隧洞末端压力开始出现上升。所以阻抗孔直径初选为 3.07m。根据稳定断面选择原则，根据托马临界断面公式，可算出临界断面面积，调压室直径为 12m 时调压室最高水位符合规范要求，但波动稳定时间较长，综合经济技术方案，调压室直径初选为 14m，满足稳定断面选择要求且技术方案相对经济。

调压室尺寸初步选定后，对表 4-6 分析。由表可知，工况 2 时调压室水位出现最大值。此时水位最大值为 526.5m，距调压室顶端 5.5m，满足规范要求。工况 3 时调压室水位出现最小值。此时水位最小值为 474.1m。与调压室底板高程差为 4.6m，满足规范要求。

如图 4-4~4-9 所示：为关闭时间 $T_s=7s$ ，阻抗孔直径 $d=3.07m$ ，调压室直径 $D=14m$ 时工况 1、工况 2 仿真结果相应曲线。图 4-10 为工况 3 时的调压室涌浪水位曲线。

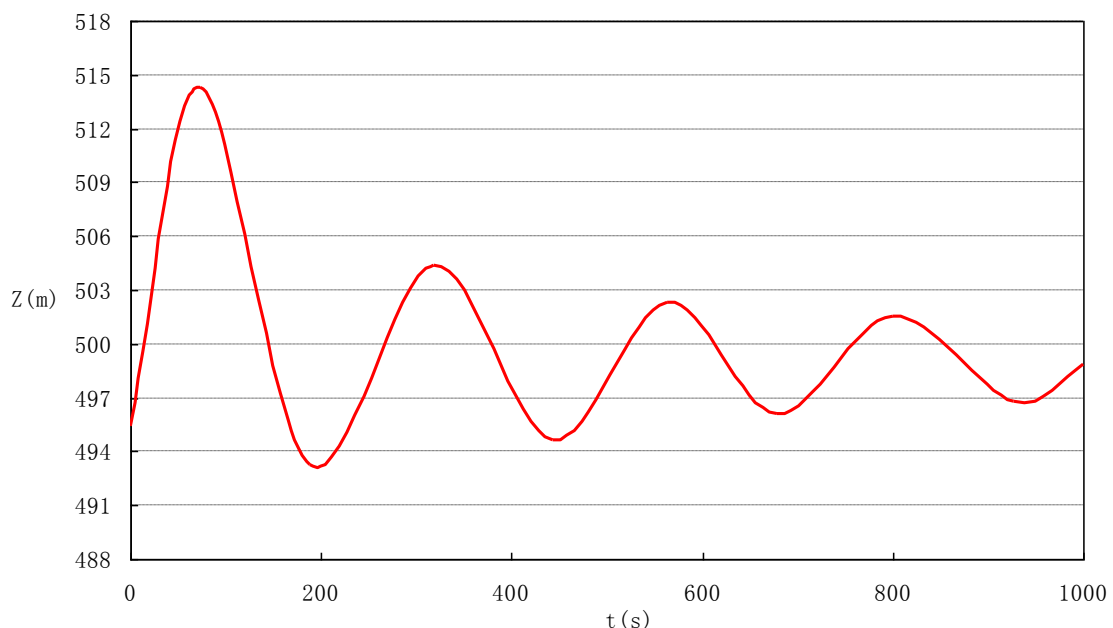


图4-4 工况1涌浪水位

Fig4-4 Surge water level of Condition 1

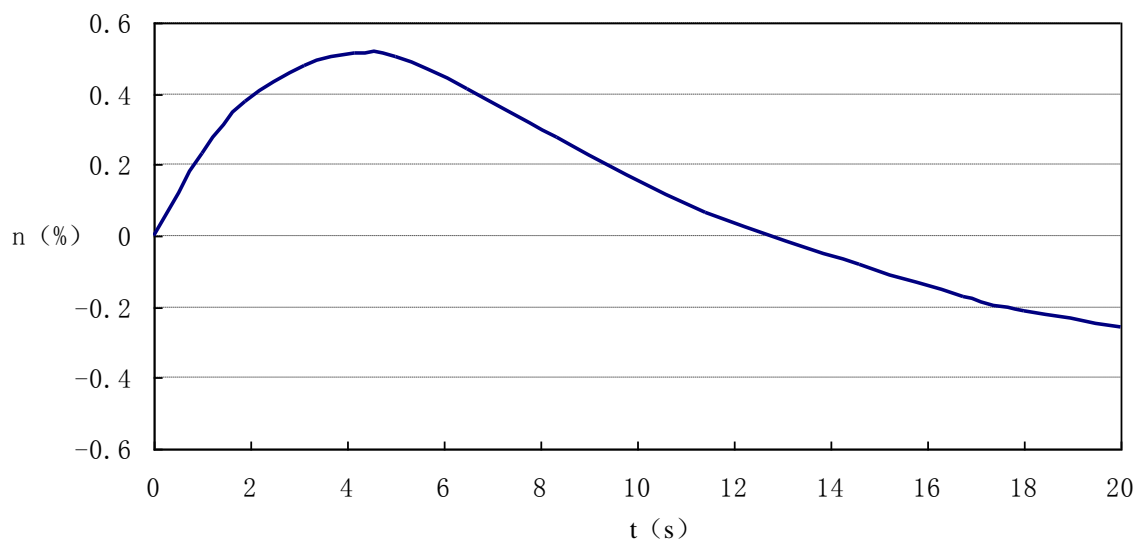


图 4-5 工况 1 机组转速
Fig4-5 The speed of the turbine of Condition 1

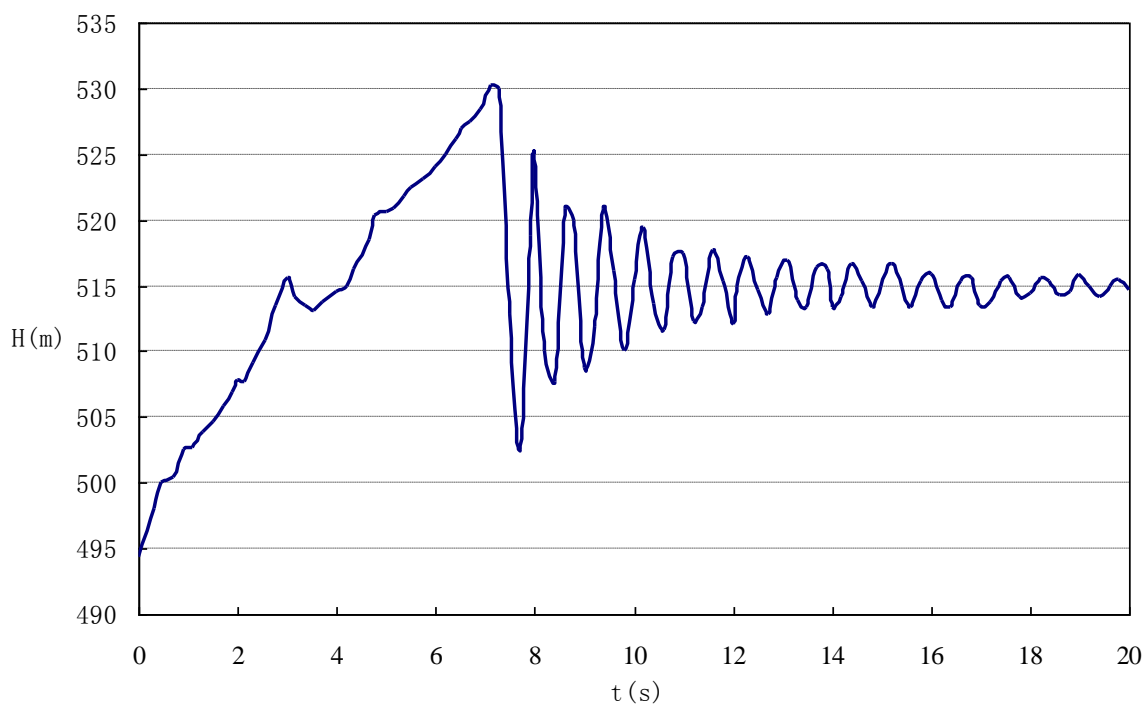


图4-6工况1蜗壳末端压力
Fig 4-6 The pressure at the ends of volute of Condition 1

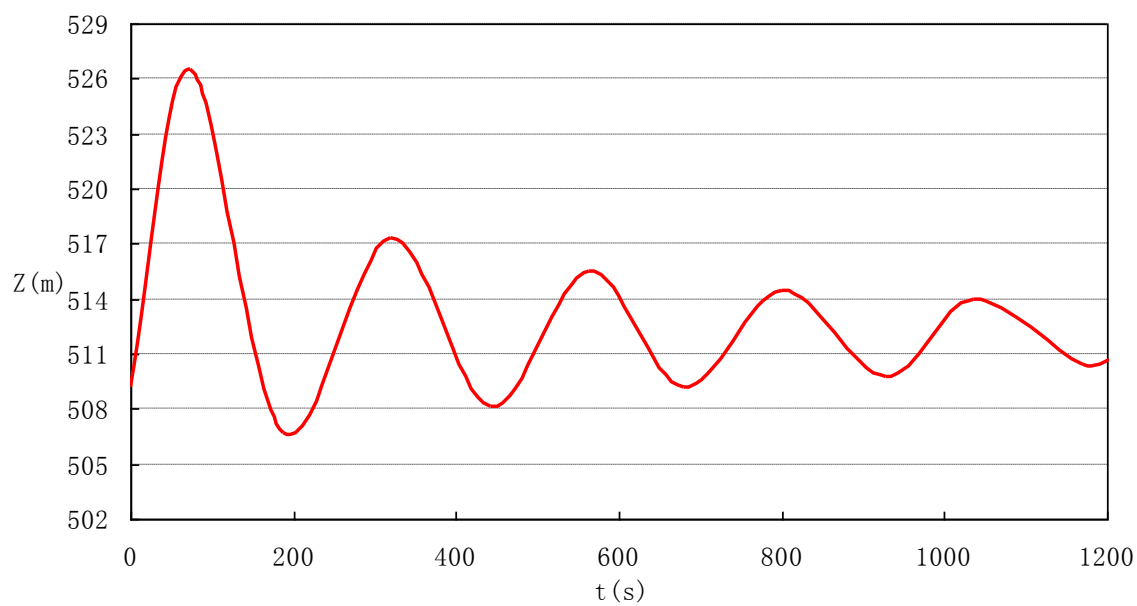


图 4-7 工况 2 涌浪水位
Fig 4-7 Surge water level of Condition 2

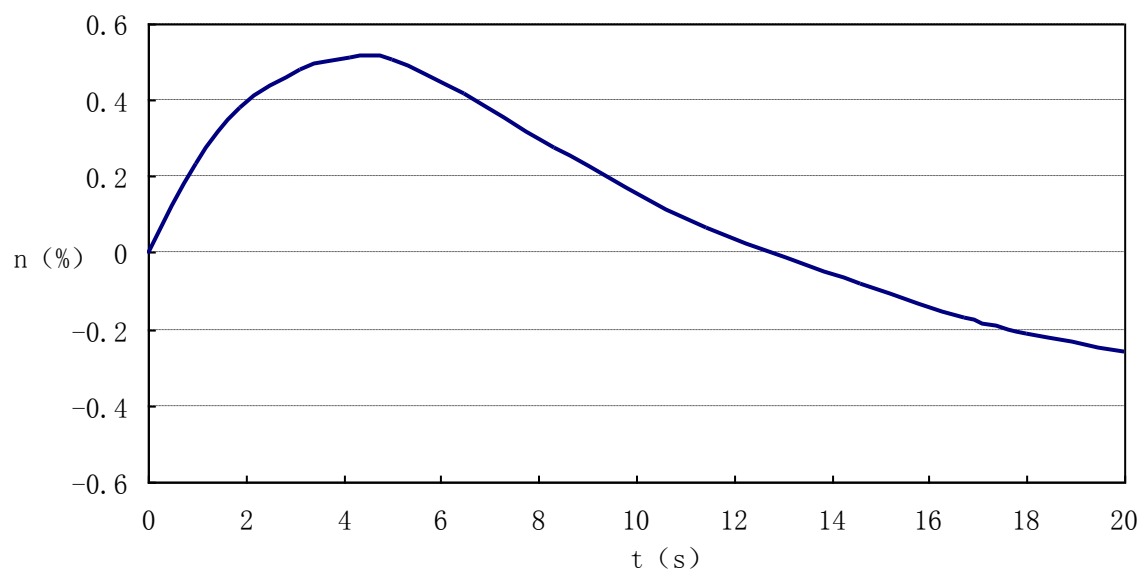
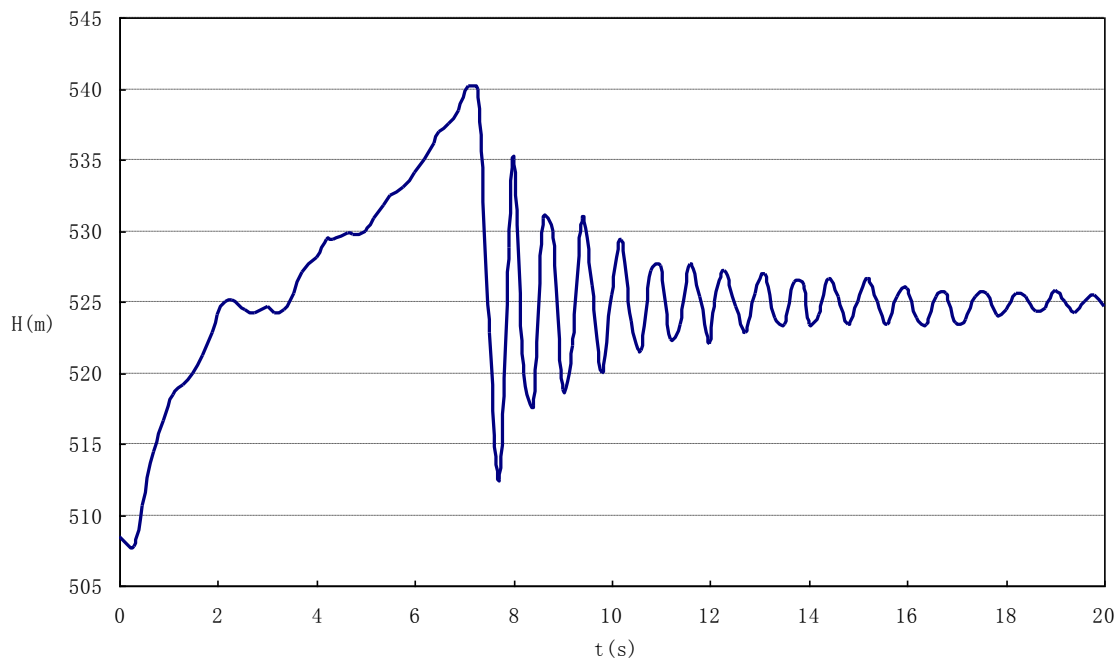


图 4-8 工况 2 机组转速
Fig 4-8 The speed of the turbine of volute of Condition 2



4-9工况2蜗壳末端压力

Fig 4-9 The pressure at the ends of volute of Condition 2

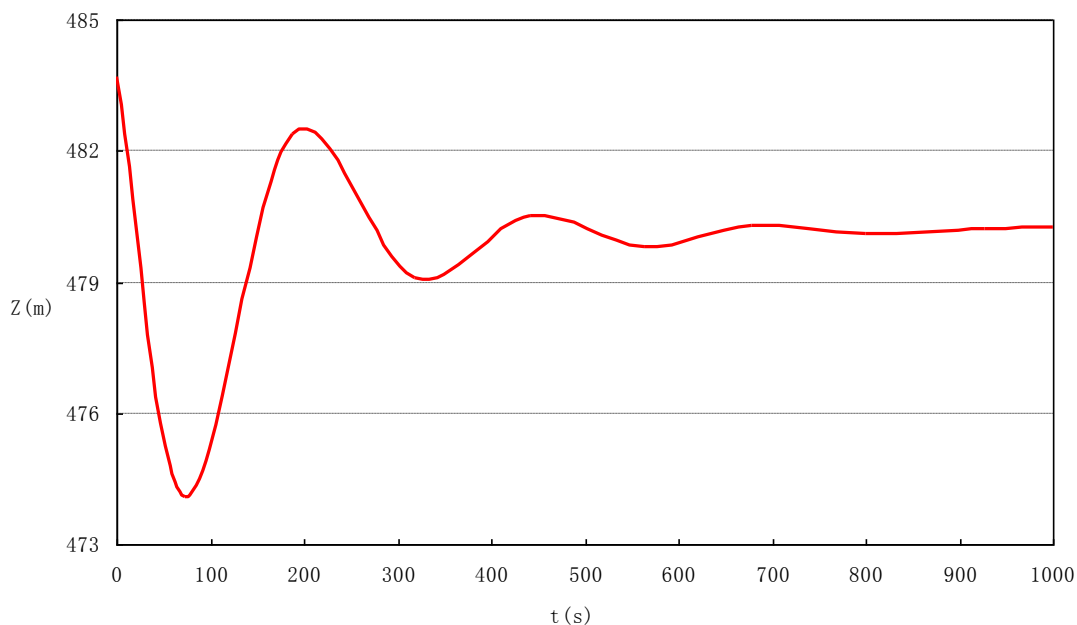


图4-10工况3涌浪水位

Fig 4-10 Surge water level of Condition 3

4.5 本章小结

本章结合工程实例，根据所建立的系统数学模型，通过编制的电算程序实现电站过渡过程的仿真计算。优化确定了导叶关闭时间和调压室尺寸，并计算给出控制工况下的机组转速上升、蜗壳末端压力上升、调压室最高及最低水位以及相应的过渡过程曲线。

5 结束语

分析计算水力过渡过程可以为电站的优化设计及稳定安全运行提供重要依据, 本论文在对国内外过渡过程领域研究的基础上, 提出研究内容。本文基于特征线法, 在对各相关条件做出假设的前提下建立起用于电站水力瞬变过程分析的数学模型和相关边界条件。结合具体工程利用 Matlab 编制出电算程序。最终实现瞬变过程仿真。

主要成果如下:

(1) 根据电站引水发电系统的布置及建筑物组成, 基于特征线法, 建立了计算数学模型和相关边界条件(模型建立过程中均考虑水流方向, 非线性, 摩阻的影响)。详细推导了水击基本方程, 介绍了其实用解法-特征线法。并对特征线法在水力计算中的应用加以说明。最终实现有压引水系统中两种波的联合计算;

(2) 对调压室的涌浪水位计算及稳定断面选择问题进行了讨论。根据计算结果确定了调压室的优化断面尺寸。并通过计算确定了 T_s 。

(3) 结合某水电站工程, 拟定了多种计算工况, 实现了大波动过渡过程仿真与分析。计算给出了设计工况下机组的调节保证参数、调压室最高及最低水位及相应的过渡过程曲线。

利用 Matlab 对水电站过渡过程进行仿真分析, 可以快速精准的得到仿真结果。同时与其他计算程序的对接较为方便, 为更加广泛、更加深入的对水电站过渡过程研究提供了平台, 这也是本文的创新之处。

基于前人研究成果之上, 本文对过渡过程问题实现了一些研究成果。但是由于在模型建立的过程中及数据处理的过程中经常要采取假设及近似处理, 所以计算的结果会出现误差, 以及其它没有考虑到的及其他复它因素也会对计算造成误差, 所以还有很多工作需要继续探讨研究。

(1) 在水力瞬变流的计算中, 通常将定常流状态得出的水轮机综合特性曲线进行插值、外延以得到水轮机的全特性并加以应用。从而得出计算所需的小开度及制动区的特性, 但是与实际的数据存在很大偏差, 从而对计算结果造成影响。

(2) 在水力瞬变流的计算中, 瞬变流中的沿程及局部损失也用定常流条件下导出的摩阻公式来计算, 这种假设与简化往往无法反映水流的真实流态变化;

(3) 在计算机组转速时, 通常不考虑水轮机叶片间的水流惯性对机组转动惯量的影响, 从而造成计算的机组转速上升值与实际值之间的误差;

(4) 在模型建立过程中, 管道系统通常采取当量化处理, 即将实际管道采用当量管来近似表示, 以简化计算过程, 但当量化的过程使得管道的弹性与惯性与实际相比产生失真, 且实际流道的不连续性亦得不到真实反映。而且在管道的当量化过程中通常采取改变水击波速的方法, 水击波速的计算一般也是由近似公式得出, 所以不可避免会产生进一步的误差。

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.Chu Qinghe, Li Weixian, Niu xiubo. The Application of S7-200 PLC Reactive Compensation Device in Small Substation [C]. Hangzhou:IHMSC2013(2):182~185

2. 楚清河, 牛秀博. 基于 SIMULINK 的水轮机调节系统非线性仿真模型研究[J]. 吉林水利, 2014 (6): 17~20.

3. 牛秀博, 谢利云. 沿海城市防洪工程水下钻孔灌注桩的质量控制要点浅析[J]. 水利科技与经济, 2014 (11): 128~130.

致 谢

本论文能够有效顺利的完成，首先要感谢我的导师楚清河教授，得益于导师的悉心指导，在三年的研究生学习期间，在创新、科研、学习、团队协作等方面都有了很大的提高。老师严谨的治学态度，使我认识到：应该时刻以老师为榜样，在研究、学习中拿出更加严谨的态度。老师渊博的学识使我获益匪浅，在这即将毕业之际，谨向老师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢，感谢老师在这三年中给予的关心与照顾。

同时，对研究生阶段的各位任课老师表示感谢，感谢各位老师对我的教导，毕业之际，向各位老师表示衷心的感谢。

再次，感谢家人和朋友对我的关心与照顾，你们的关心与支持使我在学习和生活中有了更加坚定的毅力与信心，我也会更加努力去回报你们对我的付出。

三年的研究生生活，同学之间和睦相处，感情真挚。毕业之际，向帮助过我的师兄师姐及同师门的刘团结、王亚龙、康杰、魏媛媛、索宏伟、董阳、邢鹏飞表示感谢。另外，感谢我的室友刘玉龙、张璐在对我的帮助与支持。

最后，对各位答辩委员专家和论文评审专家表示衷心感谢。

姓 名：牛秀博

2015 年 4 月 10 日

参考文献

- [1] 沈祖诒. 水轮机调节系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991(10).
- [2] 沈祖诒. 水轮机调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [3] 吴荣樵, 陈鉴治. 水电站水力过渡过程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [4] 杨开林著. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [5] 陈璧宏, 周发毅. 水电站和泵站水力过渡流[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2001.
- [6] 刘竹溪, 刘光临著. 泵站水锤及其防护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [7] 湖南省水力发电工程学会, 湖南省电力公司编. 水电站事故[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] 何文学, 李茶青. 水电站大波动过渡过程研究现状及发展趋势. 水利水电科技进展. 2003(23).
- [9] 王树人. 水击理论与水击计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [10] 孙美凤, 王佳. 基于MATLAB的水力过渡过程数字仿真[D]. 人民长江, 2013.
- [11] 郑源, 张健主编. 水力机组过渡过程. 北京大学出版社, 2008.
- [12] 潘家铮, 傅华编. 水工隧洞和调压室[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [13] 丁浩编. 水电站有压引水系统非恒定流[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [14] 陈乃祥. 水利水电工程的水力瞬变仿真与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [15] 魏先导. 水力机组过渡过程计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [16] 雷恒. 水电站水力过渡过程数字仿真及分析[D]. 成都: 西华大学, 2006.
- [17] C. Jaeger. The Double Surgery Tank System. Water Power, September, 1957.
- [18] Tijsseling A S.. Fluid-Structure Interaction in Liquid-filled Piping System[J]. A Review Journal of Fluids and Structures, 1991, 573~595.
- [19] Streetor VL, and EB Wylie. Hydraulic Transients[M]. McCraw-Hill BookCo. New York, 1967.
- [20] Yong T. Hydraulics Investigation. Subservient to an Intended Croonian Lecture on the Motion of Blood. Phliosophical Transaction of the Royal Society, 1808, 2~13.
- [21] 索丽生. 国外瞬变流研究进展[J]. 河海科技进展, 1991, 22(1): 8~11.
- [22] Brown F T. The Transient Response of Fluid Lines[J]. Journal of Basic Engineering ASCE. 1962, 88(12): 546~553.
- [23] Andersin A. Menabrea's Note on water Hammer[J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 1976, 102(3): 29~39.
- [24] Calame J and Gaden D. Theoriedes chambrese quilibre[M]. Paris, 1926.
- [25] Frank J and Schuller, J. Schwingungen in den Zuleitungs- und Ableitungskanalen Von

Wasserkraftanlagen[M]. Springer, Berlin: 1938.

[26] Brunone B, Golia U M and Greco M.. Some Remarks on the Momentum Equation for Fast Transients[J]. International Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation. 9th Table, IAHR. Valencia, Spain, 1991, 140~148.

[27] Cunningham W J. Introduction to Nonlinear Analysis[M]. Mc Grow Hill Book Company, Inc. New York, 1958.

[28] 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.

[29] Ruus E. Stability of Oscillation in Simple Surge Tank[J]. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 1969, 95(10): 1577~1587.

[30] 董兴林. 水电站调压井稳定断面的研究[J]. 水利学报. 1980, 11(8): 28~30.

[31] 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]. 水利学报. 1998, 29(11): 6~16.

[32] 王树人, 马吉明. 新式差动式调压井水锤穿室的理论分析[J]. 水力发电学报, 1985. 9: 34-36.

[33] 耶格尔著. 水力不稳定流[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987.

[34] 乔德里 M. H. 著. 实用水力过渡过程. 四川水力发电工程学会, 1985. 9.

[35] 克里夫琴科著. 水电站动力装置中的过渡过程[M]. 北京: 水利出版社, 1981.

[36] 吴持恭主编. 水力学(上, 下)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.

[37] 孙铭德, 黄索逸编. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[38] 周雪漪. 计算水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.

[39] 陈嘉谋. 水轮机调节系统计算机仿真[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

[40] 黄素逸. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[41] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.

[42] 林秉南. 明渠非恒定流(第一卷)[M]. 北京: 水利水电出版社, 1987.

[43] 王树人. 调压室计算理论及方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.

[44] Streeter V L and Lai C. Water Hammer Analysis Including Fluid Friction[J]. Hyd.Div. May, 1962, 79~112.

[45] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 华中理工大学出版社, 2000.

[46] Wylie E B and Streeter V L. Fluid Transients [M]. McGraw-Hill International Book Company, 1978.

[47] 阮文山, 杨建东, 李进平. 水电站过渡过程中的反击式水轮机边界条件及迭代收敛条件[J]. 水利学报, 2004(9).

[48] 雷恒. 水电站水力过渡过程数字仿真及分析[D]. 成都: 西华大学, 2006.

[49] 陈家远. 水力过渡过程的数学模拟及控制[M]. 四川大学出版社, 2007.

- [50] 孙美凤. 长引水系统电站过渡过程数字仿真[J]. 哈尔滨: 水利科技与经济, 2013, 19 (3): 28-32.
- [51] 赵正飞. 水电站有压引水系统水力过渡过程若干问题的计算研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [52] 刘大恺. 水轮机(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [53] 姜琦昇. 水泵水轮机全特性曲线处理及过渡过程计算[D]. 西安理工大学, 2014.
- [54] 刘启钊主编. 水电站调压室[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [55] 刘保华. 水电站过渡过程的电算方法[M]. 成都: 水电部成都勘测设计院机电处, 1985.
- [56] Thomas. Zur Theorie des Wasserschlosses bei Selbsttaetig Geregelten Turbine anlagen [J]. Oldenburg, Munchen, Germany, 1910.
- [57] 国家电力公司西北勘测设计研究院. 藺河口水电站工程初步设计(修编)报告[R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院, 1999.
- [58] 西安理工大学水利水电学院. 藺河口水电站压力引水系统水力学模型试验报告[R]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- [59] 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.
- [60] 中华人民共和国电力行业标准. DL/T5059-1996水电站调压室设计规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [61] 周博, 谢东来. Matlab科学计算[M]. 机械工业出版社, 2010.
- [62] 楚清河. 水轮机导叶关闭规律的研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 2005.

态，即
初始状态，
对 于
 $t_0 + \Delta t$

$$t_0 + 2\Delta t$$

$$t_0 + \Delta t$$

$$H < 40m$$

$$\zeta = 0.7 \sim 0.5$$

$$H = 40 \sim 100m$$

$$\zeta = 0.5 \sim 0.3$$

$$H > 100m$$

万方数据

$$\zeta < 0.3$$