ICS 23.080
CCS P 60

团 体 标 准

T/CHES XXX—2023

有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护技术导则

Technical guide for hydraulic transient process calculations and water hammer protections of pressurized water transmission systems

（报批稿）

2023-XX-XX 发布 2023-XX-XX 实施

中国水利学会 发 布

前　　言

本标准按照《工程建设标准编写规定》（建标〔2008〕182 号）的规定起草。

本标准共分为 7 章和 12 个附录，主要技术内容包括总则、术语、基本规定、水力过渡过程计算模型、水力过渡过程数值计算、水锤防护措施的选择、计算成果与报告编制等。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条 16 号，邮编 100053），以便今后修订时参考。

本标准主编单位：中国农业大学

本标准参编单位：中国水利水电科学研究院
武汉大学
太原理工大学
中国灌溉排水发展中心
浙江省水利学会
哈尔滨大电机研究所
长江设计集团有限公司
浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司
中水北方勘测设计研究有限责任公司
陕西省水利电力勘测设计研究院
宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司
株洲南方阀门股份有限公司
上海凯泉泵业（集团）有限公司
利欧集团湖南泵业有限公司
江苏航天水力设备有限公司
赛莱默（中国）有限公司

本标准主要起草人：王福军、李小芹、杨开林、蒋　劲、张士杰、谢丽华、汪宝罗、吴建华、戚兰英、唐学林、李端明、白绵绵、桂绍波、黄从兵、苏胜利、王腾伟、胡海英、芦洪钟、吴喜东、牛茂升、徐秋红、李　娜、姚志峰、宋梦斌、李甲振。

本标准主要审查人：XXX、XXX、XXX。

目次

1 总则 ……1
2 术语 ……2
3 基本规定 ……4
3.1 基础数据获取 ……4
3.2 计算大纲制订 ……4
4 水力过渡过程计算模型 ……6
4.1 系统元件拓扑结构 ……6
4.2 基本方程与求解方法 ……6
4.3 边界条件 ……6
4.4 初始条件 ……7
4.5 计算参数 ……7
4.6 计算网格与时间步长 ……7
4.7 计算监视点 ……8
4.8 计算软件 ……8
5 水力过渡过程数值计算 ……9
5.1 计算结果应用 ……9
5.2 计算方案与工况 ……9
5.3 数值计算 ……9
5.4 计算结果与处理 ……9
6 水锤防护措施的选择 ……11
6.1 基本要求 ……11
6.2 防护措施 ……11
7 计算成果与报告编制 ……13
7.1 计算成果 ……13
7.2 计算报告编制 ……13
附录 A 库朗条件 ……14
附录 B 有压输水系统基本控制方程 ……15
附录 C 特征线法原理与计算步骤 ……17
附录 D 水泵机组运动方程 ……18
附录 E 管道水头损失计算方法 ……19
附录 F 水泵 Suter 曲线 ……21
附录 G 水泵机组转动惯量计算方法 ……24
附录 H 水锤波速计算方法 ……25
附录 J 有压重力流输水系统计算工况 ……26
附录 K 泵送加压输水系统计算工况 ……27
附录 L 常用水锤防护措施 ……29
附录 M 计算报告编写格式 ……31
本标准用词说明 ……32
引用标准名录 ……33

条文说明 ……34

Contents

1 General ····· 1
2 Terminologies ····· 2
3 Basic regulations ····· 4
3.1 Basic Data Acquisition ····· 4
3.2 Calculation Strategy Planning ····· 4
4 Calculation Models for Hydraulic Transient Process ····· 6
4.1 Topological Structure of System Elements ····· 6
4.2 Basic Equations and Solution Methods ····· 6
4.3 Boundary Conditions ····· 6
4.4 Initial conditions ····· 7
4.5 Calculating Parameters ····· 7
4.6 Computational Grid and Time Step ····· 7
4.7 Calculation Monitoring Points ····· 8
4.8 Calculation Software ····· 8
5 Numerical Calculation of Hydraulic Transient Process ····· 9
5.1 Applications of Calculated Results ····· 9
5.2 Calculation Schemes and Working Conditions ····· 9
5.3 Numerical Calculation ····· 9
5.4 Calculation Results and Processing ····· 9
6 Selection of Water-Hammer-Protection Measures ····· 11
6.1 Basic Requirements ····· 11
6.2 Protection Measures ····· 11
7 Calculation Results and Report Preparation ····· 13
7.1 Calculation Results ····· 13
7.2 Preparation of Calculation Report ····· 13
Appendix A Courant Conditions ····· 14
Appendix B Basic Control Equations for Pressurized Water Delivery Systems ····· 15
Appendix C Principle and Calculation Steps of Method of Characteristics ····· 17
Appendix D Motion Equation of Water Pump Unit ····· 18
Appendix E Calculation Method for Pipeline Hydraulic Loss ····· 19
Appendix F Suter Curves of Water Pump ····· 21
Appendix G Calculation Method for Rotational Inertia of Water Pump Unit ····· 24
Appendix H Calculation Method for Water-Hammer Wave Velocity ····· 25
Appendix J Calculation Conditions of Gravity-Pressure Water Transimission System ····· 26
Appendix K Calculation Conditions of Pump-Pressure Water Transimission System ····· 27
Appendix L Common Protection Measures for Water Hammer ····· 29
Appendix M Writing Format for Calculation Report ····· 31
Explanation of Words Used in This Standard ····· 32
Article Explanations ····· 33

Commentaries ……34

1 总则

1.0.1 为规范有压输水系统水力过渡过程计算和水锤防护的技术要求，保障有压输水系统安全稳定运行，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建、扩建和改建的有压输水系统的稳定流动计算、瞬变流动计算、水锤防护方案设计、水锤防护措施优选及效果分析。本标准不适用于水力发电和抽水蓄能电站的引水系统、泄洪洞和导流洞的过渡过程计算。

1.0.3 有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护应该贯彻“安全、可靠、规范、有效”的指导原则。

1.0.4 有压输水系统水锤防护应结合实际，因地制宜，统筹安排，并妥善协调工程设计，积极推广应用新技术、新材料、新工艺、新设备和新产品。

1.0.5 有压输水系统水力过渡过程计算和水锤防护除应执行本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 有压输水系统 pressurized water transmission systems

从取水口到出水口之间为有压的输水系统，包括有压重力流输水系统和泵送加压输水系统。

2.0.2 水力过渡过程 hydraulic transient process

有压输水系统从某一稳定运行状态到另一稳定运行状态随时间的变化过程。

2.0.3 水锤 water hammer

有压输水系统中因阀门启闭或水泵启停等外部影响，导致水体速度急剧变化而产生的水体压力交替升降的一种现象。

2.0.4 元件 element

有压输水系统中具有独立功能的、可用单一模型表示的水力部件，是水力过渡过程计算的基本单元。

2.0.5 节点 node

用于实施有压输水系统在稳态工况与瞬态工况下的流动计算而设置的计算点位置。

2.0.6 拓扑结构 topological structure

输水系统中各元件之间的连接关系，表示输水系统的空间布局。

2.0.7 边界条件 boundary condition

有压输水系统各元件在运行期间已知的管道、水工设施及设备性能参数信息。

2.0.8 稳态工况 steady condition

有压输水系统中主要流动参数随时间保持不变状态的一个特定工况。

2.0.9 瞬态工况 transient condition

有压输水系统中，阀门启闭或水泵启停等导致的水流状态快速变化的工况。

2.0.10 瞬变流 transient flow

瞬态工况下有压输水系统中的非恒定流动。

2.0.11 水力过渡过程计算 calculation of hydraulic transient process

求解有压输水系统及其各元件的动态参数随时间变化的过程。

2.0.12 泵全特性曲线 full characteristic curves of pump

以流量和转速分别为横坐标和纵坐标，在四个象限内分别给出的水泵工况、制动工况和水轮机工况等各种工况参数相互关系的特性曲线。是进行水泵水力过渡过程计算的基础资料。

2.0.13 水泵 Suter 曲线 Suter curves of pump

基于泵全特性曲线，根据量纲和相似原理建立的水泵扬程、转矩与流量转速组合参数之间的关系曲线，包括无量纲扬程特性曲线和无量纲转矩特性曲线。

2.0.14 水锤防护装置 protection device of water hammer

以消减有压输水工程发生的水锤对系统运行产生不利影响为目的技术装置。

2.0.15 液体汽化 liquid vaporization

当有压输水系统中局部压力下降到水的饱和蒸汽压以下时，在该处产生的水流由液态变为汽态的现象。

2.0.16 水柱分离 water column separation

输水管线中的局部压力下降至空化压力以下，管道中的水柱出现分离，并伴随真空的现象。

2.0.17 时程线 time line

有压输水系统水力过渡过程中动态参数随时间的变化曲线。

2.0.18 最高压力线 maximum pressure curve

在水力过渡过程期间，管道沿线各点的最高压力值与从管道起点计的水平长度之间的关系曲线。

2.0.19 最低压力线 minimum pressure curve

在水力过渡过程期间，管道沿线各点的最低压力值与从管道起点计的水平长度之间的关系曲线。

2.0.20 监视点 monitoring point

在有压输水系统的管道上预设的一些特定位置，用来储存和分析计算过程中的动态参数变化。

2.0.21 惯性元件 inertia element

水力系统中可看作是非弹性的、内部储有不可压液体的元件。

2.0.22 特征线法 method of characteristics

一种基于特征线来计算输水系统水力过渡过程的数值方法。该方法首先将一维输水系统在空间域离散为若干段，在时间域离散为若干时间步，然后联合正特征线方程和负特征线方程将瞬变流偏微分控制方程转换为常微分方程，接着将常微分方程在时间域进行离散得到代数方程组，最后借助边界条件和上一个时间步的解来求解代数方程组，可得到该时间步离散节点处水流速度和压力。

2.0.23 波特性法 wave characteristic method

一种基于压力波传播特性来计算输水系统水力过渡过程的数值方法。该方法认为瞬态流动特性是由于管道系统中的扰动（如阀门启闭和泵断电）所产生的压力波而导致的，压力波在管内液体介质中以声速传播，并在所有不连续处（如管道接头、管道开口端、管道封闭端、泵和调压室）发生部分传输和反射。在面向瞬变事件的系统仿真环境中求解瞬态流动方程则可得到每个时间步上离散节点处水流速度和压力。

3 基本规定

3.1 基础数据获取

3.1.1 应根据有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护的需要，获取基础数据。

3.1.2 基础数据包括下列数据和资料：

1 工程概况、工程任务和工程等别。

2 输水系统平面布置图、纵剖面图和横剖面图。

3 进水池与出水池特征水位。

4 当地海拔、纬度、气温和水温。

5 输水系统管道及元件的特性参数与特性曲线。

6 水泵机组的主要参数及全特性曲线。

7 水锤防护装置的性能参数与性能曲线。

8 各元件的连接搭配方式，输水管网可能的运行方式。

9 输水系统在每种可能运行（调度）方式下的边界条件和初始条件。

10 水力过渡过程发生时水锤防护控制值。

11 其它必需的相关文件。

3.2 计算大纲制订

3.2.1 应根据水力过渡过程计算与水锤防护任务和要求，编制计算大纲。计算大纲在计算过程中可作必要的修正。

3.2.2 计算大纲内容应包括项目概况、工程基本资料、计算目的和内容、计算依据、水锤防护标准、技术路线及模拟方法、计算工况、计算方案、进度计划、预期成果、计算负责人和参加人员。

3.2.3 计算方案编制应包括稳态工况计算、瞬态工况计算和水锤防护计算三部分内容。

3.2.4 稳态工况计算方案编制应符合下列要求：

1 计算的初始条件接近实际情况。

2 依据计算工况，设置边界条件、布置监视点和确定计算结果的输出内容及方式。

3 采用的计算模型符合稳态工况计算要求，元件的特性参数符合输水管网实际。

4 计算工况覆盖输水系统可能出现的最不利运行范围。

5 计算得到的输水系统水位、压力和流量应以列表及曲线方式输出。

6 搭建计算模型接近实际情况，管线的扩散管段可进行当量转换。

3.2.5 未加防护装置瞬态工况计算方案编制应符合下列要求：

1 计算工况覆盖有压输水系统可能的最不利工况及运行转换工况。同时，工况选择应考虑水锤防护装置的布置方案。

2 依据计算工况，确定满足计算目的的计算模型，获取边界条件，布置监视点，确定计算时长和计算结果的输出内容及方式。

3 计算采用的时间步长，满足附录 A 中的库朗条件要求。

4 计算中设置的监视点宜落在压力或流量最不利的位置附近，数量应至少覆盖典

型节点。

5　计算结果包括瞬态工况的相关曲线。

3.2.6　水锤防护计算方案编制应符合下列要求：

1　水锤防护计算工况应结合 3.2.5 条进行选择。

2　水锤防护计算的内容包括主要瞬变过程的水锤防护分析。

3　水锤防护措施应进行比选。所选择的水锤防护装置宜易于施工和维护、便于运行管理、经济性好，与工程等别相匹配。

3.2.7　水锤防护控制值应符合下列要求：

1　在水力过渡过程中管道最高压力不应大于相应位置处最高工作压力的 1.5 倍。

2　在水力过渡过程中有压输水系统最低压力在考虑海拔修正后应不宜低于-4.0m，对于最低压力低于 0m 的压力管道应进行抗外压安全性复核。隧洞有压输水系统的最低压力应满足《水工隧洞设计规范》SL 279 的规定；预应力钢筒混凝土管道有压输水系统的最低压力应满足《预应力钢筒混凝土管道技术规范》SL 702 的规定。针对采用虹吸断流措施的扬水系统，在水力过渡过程中驼峰处最低压力在考虑海拔修正后不宜低于-8.0m。

3　对于离心泵加压输水系统，事故停泵时水泵机组最高反转转速及超过额定转速的持续时间应按《泵站设计标准》GB 50265 的规定执行。对于轴流泵和混流泵加压输水系统，事故停泵时水泵机组最高反转转速不应超过额定转速的 1.5 倍，超过额定转速的持续时间不应超过 2min。

4　输水系统任何部位不应出现液体汽化和水柱分离现象。

5　调压室的最高涌波水位、最低涌波水位和安全超高应符合《水利水电工程调压室设计规范》SL 655 的规定。

4 水力过渡过程计算模型

4.1 系统元件拓扑结构

4.1.1 应根据有压输水系统实际所包含的所有元件，确定元件间的相互连接性和数据参数的一致性。

4.1.2 应根据有压输水系统的流动方向和几何位置，构建系统元件拓扑结构，并正确设置相关元件的模型参数和性能参数。

4.1.3 系统元件拓扑结构应符合下列要求：

1 系统元件拓扑结构应反映实际工程现状。

2 占整个管网系统比较小的并联管道可采用等效管道代替。

3 渐变管系可采用一段跨越该管段的当量均匀管近似其特性。

4 当管长小于波长的 4%时，管系中的短管可采用惯性元件。

4.2 基本方程与求解方法

4.2.1 水力过渡过程计算模型应按附录 B 所列基本方程构建。

4.2.2 基本方程的求解方法宜采用附录 C 所列特征线法进行，也可采用波特性法进行。

4.2.3 计算中使用的基本方程数值离散格式应满足相容性、收敛性和稳定性要求。计算模型宜同时能模拟稳定流动和瞬变流动。

4.2.4 水泵机组转速变化过程求解应采用附录 D 给出的水泵机组运动方程。

4.3 边界条件

4.3.1 当每一段管道两端的节点都只有可利用的一个特征线上的相容方程时，应同时补充相应的边界条件方程，确定相应边界上的水力参数。所有系统组成元件均宜为以边界条件方式参与管道端点的数值计算。

4.3.2 模拟范围内的组成元件边界条件应包括水力系统中的所有元件及水锤防护元件的边界条件。这些元件的边界条件设置应满足下列要求：

1 上、下游水库（水池）边界应给定水位变化规律。

2 串联管道按各管段水头损失相加、流量相等的边界条件设置。

3 并联管道按各管段水头损失相等、流量相加的边界条件设置。

4 分叉管道按各分叉管段水头损失相等、流入与流出流量相等的边界条件设置。

5 管道给定沿程水头损失系数和局部阻力系数。

6 管线阀门给定阀门开度与局部阻力系数的关系曲线。

7 水泵给定转速与流量、扬程、轴功率关系以及水泵机组转动惯量，以及用于描述水泵参数变化的水泵 Suter 曲线或泵全特性曲线。

8 空气罐应给定罐内气体类型、初始压力、容积及进出口水力阻力系数。

9 泵出口工作阀门给定阀门阻力系数与开度的关系，以及阀门的动作方式。

10 压力波动预止阀给定设计初始开阀压力、动作时间、阀门的关闭特性及预止阀弹簧系数。

11　水击泄放阀给定设计初始开阀压力和动作时间。

12　空气阀给定阀门进排气口径和进排气流量系数曲线。对于带有微排功能的空气阀，给定微排流量系数曲线。

13　调压室给定调压室型式和高度、断面面积与高度关系、进出口阻力系数及顶部溢流系数等。

14　其他特殊的元件按元件的流动特性要求给定。

4.4　初始条件

4.4.1　初始条件应包含瞬变过程开始前稳定工况下整个输水系统的主要水力参数，包括各计算节点的水流速度和压力（或水头），还包括所有元件的初始状态。

4.4.2　对于初始水流速度不为零的初始条件，应按稳定工况对整个输水系统进行水力计算，并将计算结果作为瞬变计算的初始条件。

4.4.3　输水系统初始压力宜以水力坡降线图表示。

4.5　计算参数

4.5.1　管道水头损失包括沿程水头损失和局部水头损失，应按附录 E 给定的方法确定。

4.5.2　用于确定水泵稳态运行工作点的水泵性能曲线，应由水泵制造商提供。在规划或可研等无法确定水泵性能曲线的阶段，可选用已有的相近比转速泵的性能曲线代替。

4.5.3　水泵 Suter 曲线应由水泵制造商提供，或者由水泵制造商提供的泵全特性曲线后通过相似转换而得。在规划或可研等无法确定水泵 Suter 曲线的阶段，可选用已有的相近比转速泵的水泵 Suter 曲线代替。在没有可靠水泵 Suter 曲线供参考的情况下，可从附录 F 选择两种相近比转速泵的水泵 Suter 曲线，通过插值确定所需要泵的水泵 Suter 曲线。

4.5.4　对于水泵轴与电动机轴直联的情况，水泵机组的转动惯量等于电动机转动惯量和水泵转动惯量之和。电机转动惯量应为电机空载转动惯量。水泵转动惯量应包含叶轮内水体在内的水泵转动部分的转动惯量。电动机转动惯量和水泵转动惯量应由设备制造商提供。在规划或可研等无法确定水泵机组转动惯量的阶段，可按附录 G 给定的方法确定。

4.5.5　阀门、空气阀和调压室等元件的计算参数，应由其制造商提供准确数值，或通过性能试验测得其准确数值；在规划或可研等阶段尚未确定设备型号时，可参考类似产品的性能参数，根据相关资料推算。

4.5.6　管道中水锤波传播速度应按附录 H 确定。

4.6　计算网格与时间步长

4.6.1　管道空间计算网格步长，应符合下列原则：

1　各管段的网格步长与波速比值相等。

2　各管段的网格段数为整数。

3　对于压力波动比较大的有压输水系统，网格步长应适当减小。

4.6.2　时间步长应满足附录 A 所示库朗稳定条件。

4.6.3　当复杂管道水力系统难以满足 4.6.1 条 2 款所规定的网格段数为整数时，可采取下列方法对划分结果进行调整：

1　调整波速法。允许波速在一定幅度内变化，即允许对计算得到的波速值进行调整。允许支管内水流波速相对修正系数≤10%。在允许的修正幅度之内，不同的支管可采用不同的水流波速相对修正系数，保证每一个支管的网格段数凑成为整数。

2　当量模型法。对于串联管道，按统一的计算时间步长，由上游向下游依次划分步段，空间步长为波速与计算时间步长的乘积，若其中一支管的末端剩余不足一个空间步长时，可与下一个支管的起始端部结合成“跨管空间步长”，然后再对下一个支管的其余部分继续网格划分。跨管空间步长的当量波速可按组成跨管的管段长度进行平均。

3　短管法。如果支管的末端剩余不足一个空间步长时，可通过对剩余短管段进行波速调整或刚化短管来达到目的。

4.7　计算监视点

4.7.1　计算中设置的监视点，其位置和数量应准确反映整个输水系统的稳态与瞬变流动特性。

4.7.2　监视点宜选择在泵进口、泵出口、工作阀门进口、工作阀门出口、位置最高点、位置最低点、局部高点、拐点、水锤防护元件附近及斜坡段或平直段可能出现压力极值的节点。

4.8　计算软件

4.8.1　开展水力过渡过程计算所采用的计算软件应是取得软件著作权并经实际工程验证的软件，或国际公认具有精度保障并有 3 个以上重要输水工程验证的国际商用软件。

4.8.2　可通过减小计算时间步长和空间网格步长的方法检验计算软件给出的计算精度。若减小步长前后计算结果变化较小，则数值解具有一定精度，否则应进一步减小时间步长和空间网格步长，使数值解收敛到允许误差以内。

4.8.3　在开展水力过渡过程计算前，应对计算所使用的各种元件特性参数的准确性进行率定。元件特性参数率定应针对输水系统的管道粗糙度与阻力系数、相关介质的水锤波速、阀门特性参数、空气阀特性参数以及水泵性能曲线等进行。

4.8.4　元件特性参数率定宜符合下列规定：

1　在具备试验条件的情况下，宜采用试验结果来确定元件特性参数。

2　在输水工程还不能提供主要设备具体特性的情况下，可通过已有工程或相关资料中的结果来估算元件特性参数。

3　在设备招标后，可通过中标厂家提供的设备性能曲线作为元件特性参数。

4　在输水系统验收试验阶段或正式运行阶段，可根据设备制造厂提供的设备实际特性或实测结果修正元件特性参数。

4.8.5　对于重要输水工程，应有不少于 2 家独立运行且无隶属关系的计算单位同时计算，相互验证计算结果。

5 水力过渡过程数值计算

5.1 计算结果应用

5.1.1 稳态计算结果，可应用于输水系统设计、管材和阀门的选型，并可用于输水系统的精准调度，实现各分水口的精准流量分配。

5.1.2 瞬态计算结果，可用于现有输水系统的安全性评估、爆管可能性评估、水锤防护措施的选择、系统运行方式的确定和水泵启停规律的整定。

5.1.3 计算给出的节点压力与流量信息，可应用于输水系统的调度与运行方案的可视化。

5.1.4 水力过渡过程计算结果，可作为输水系统的管线和水工建筑物的设计依据。

5.2 计算方案与工况

5.2.1 计算方案应包括下列内容：

1 输水管网系统可能出现的泵串并联和管道串并联各种组合情况。

2 不设置任何防护措施的工程运行情况和设置不同类型防护措施的情况。

3 稳态工况和瞬态工况。

5.2.2 计算工况的选择应符合下列要求：

1 按可能出现的最不利工况，拟定计算工况。

2 对管网系统的经常运行工况进行计算。对于变速运行的泵站输水系统应进行流量调节工况计算。对于梯级泵站输水系统应进行站间流量平衡工况计算。

3 计算工况应包括未加水锤防护装置时工况。

4 计算工况应包括增加水锤防护装置后的相关工况。

5.2.3 有压重力流输水系统计算工况见附录 J，泵送加压输水系统计算工况见附录 K。

5.3 数值计算

5.3.1 数值计算应借助满足本标准第 4 章计算模型构建要求的计算软件进行。计算软件应具有可靠的数值算法和完善的输入输出界面。

5.3.2 数值计算应分别完成稳态计算和瞬态计算。

5.4 计算结果与处理

5.4.1 计算结果宜以文本文件方式保存到计算机存储器上，在计算过程中或计算完成后可利用数据处理软件对计算数据进行后处理，并应以图形方式显示下列计算结果：

1 整个管网的压力包络线，包括最高压力线和最低压力线。

2 关键位置的水位/压力变化过程曲线。

3 关键位置的流量变化过程曲线。

4 水泵机组主要动态参数的变化过程曲线。

5 水泵出口工作阀门启闭规律。

6 其他曲线。

5.4.2 应给出不同管网配置方案下的计算结果对比情况，并应给出有压输水系统的调度及运行建议。

5.4.3 应开展长距离输水系统的糙率和调压室阻抗孔口流量系数等关键参数的敏感性分析。

6 水锤防护措施的选择

6.1 基本要求

6.1.1 水锤防护措施的选择应结合水力过渡过程计算结果进行，所选择的水锤防护方案应满足水力过渡过程计算结果要求。

6.1.2 水锤防护措施的类型可按附录 L 进行选择。

6.1.3 有压输水系统应安装下列水锤防护装置：

1 在泵站各水泵出水管起端，宜设置具有两阶段关闭功能的缓闭阀，也可设置止回阀，止回阀后设置安全泄压阀。在有压重力流输水管道末端（或者中部）设置调流调压阀或缓闭阀。

2 在泵站出水母管起端和有压重力流输水管道末端的工作阀上游，宜设置超压泄压阀。超压泄压阀的公称直径宜取为主管道直径的 1/5～1/4 或经水力计算确定。当管道内的静水压力很高时，超压泄压阀直径应根据静压力和泄水时间经水力计算确定。超压泄压阀的泄压值可采用最大静压力加 10%~20%。

3 当有压重力流输水干管的总作用水头超过 0.4MPa 时，宜根据管道水锤防护需要或小流量运行时消能需要设置减压阀。

4 当输水管道坡度小于 1‰时，宜每隔 500m～800m 设置进气排气阀。在管道局部高点及管道膝部宜设置进气排气阀。进气排气阀的设置位置，应根据水锤防护计算结果确定。进气排气阀的口径宜取输水管道直径的 1/12～1/5 或经计算确定。当管道压力较大或工况复杂时，应采用低压慢速排气的注气微排阀。

5 对直径大于 2000mm 的输水管道，当普通进气排气阀无法满足进气排气要求时，宜在管道的局部高点、长上升管段、长下降管段和转弯处设置真空破坏阀。

6.2 防护措施

6.2.1 水锤防护措施的初步方案，可由工程设计单位单独或联合水力过渡过程计算单位首先提出，通过对水锤防护措施进行技术经济比较推荐安全、经济、成熟、先进的水锤防护措施作为最优方案。

6.2.2 针对某种水锤防护方案的计算结果不满足所规定的水锤防护控制值时，可按下列要求重新设置水锤防护装置：

1 整定工作阀门启闭规律或更换阀门型式。

2 更改进气排气阀的型式、规格、设置的位置和数量。

3 在同时可能出现压力过高和过低的位置设置双向调压室。

4 在可能出现压力过低的位置设置单向调压室。

5 在水泵倒流倒转超过规定值时，重新整定泵后工作阀门关闭规律、增加水泵机组转动惯量或者提高机组强度要求。

6 泵后设置空气罐。

7 在泵后旁通管上设置压力波动预止阀。

8 经过论证可实际应用的新型水锤防护装置。

6.2.3 当一种水锤防护装置无法满足防护要求时，可选用两种或更多种防护装置组合。

6.2.4 推荐的最优水锤防护方案宜包括下列几方面：

1 水锤防护装置的名称、类型、尺寸、数量和安装位置。

2 典型水力过渡过程工况下的水锤防护效果。

3 防护装置的技术要求。

6.2.5 对于重要输水工程，当两家或更多家计算单位给出的水锤防护方案出入较大时，应召开专题论证会，确定最终防护方案。

7 计算成果与报告编制

7.1 计算成果

7.1.1 计算成果应包括下列内容：

1 简述水力过渡过程计算模型特点。

2 对计算结果进行可靠性和合理性分析。

3 稳态工况下水力学参数分布、瞬态工况下水力过渡过程计算结果。

4 未加水锤防护措施与施加水锤防护措施的计算结果对比分析。对于每一种水锤防护方案，应单独进行计算和分析。

5 应给出推荐的水锤防护方案和防护效果分析。

7.1.2 应绘制表征下列关系图：

1 整个管网系统的最高 / 最低压力包络线。

2 水泵机组的转速变化规律和流量变化规律。

3 最不利点的压力变化规律曲线。

4 水泵出口工作阀门前和阀门后压力变化规律曲线。

5 有调压室或空气罐防护措施时，调压室或空气罐的水位或压力变化规律。

6 水泵出口工作阀门的启闭规律。

7.2 计算报告编制

7.2.1 计算报告应包括下列主要内容：

1 摘要。包括任务来源、工程基本情况、计算方法、计算工况与计算结果和主要结论。

2 工程概况。包括基本计算资料和原始数据。

3 计算模型。包括基本控制方程、求解方法、离散格式与网格尺度、边界条件及处理方法、计算域和水泵机组特性等。

4 计算工况与要求。计算工况应包括各种可能出现的最不利工况。

5 计算结果。各种工况下的水力过渡过程计算结果，包括水锤防护方案分析。

6 推荐的水锤防护方案及其效果分析。

7 结论与建议。

7.2.2 采用图表和电子文档等方式，表征计算结果。

7.2.3 计算报告可采用附录 M 中的格式进行编写。

附录 A　库朗条件

A.0.1　水力过渡过程计算的库朗条件为

$$\Delta t \le \frac{\Delta x}{a} \tag{A.0.1-1}$$

式中：Δt——时间步长，s；

Δx——分段长度，m；

a——波速，m/s。

A.0.2　为了保证计算结果稳定，有时应对管长进行微量调整，使其满足库朗条件。

附录 B　有压输水系统基本控制方程

B.0.1　有压输水系统的基本控制方程包括运动方程和连续方程两部分，各参数描述如图 B.0.1-1 所示。

运动方程按公式（B.0.1-1）计算。

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{f}{D}\frac{v|v|}{2g}=0 \qquad \text{（B.0.1-1）}$$

连续方程按公式（B.0.1-2）计算。

$$\frac{\partial H}{\partial t}+v\left(\frac{\partial H}{\partial x}+\sin\alpha\right)+\frac{a^2}{g}\frac{\partial v}{\partial x}=0 \qquad \text{（B.0.1-2）}$$

式中：x——沿管线的长度，m；

t——时间，s；

H——测压管水头，m；

f——管道摩阻系数；

v——管内流速，m/s；

α——管道与水平面夹角，（°）；

a——水锤波传播速度，m/s；

D——管道内径，m；

g——重力加速度，m/s^2。

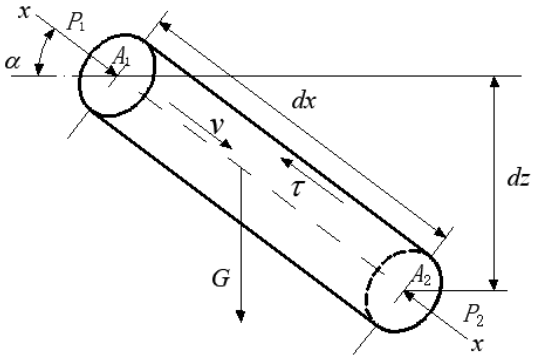


图 B.0.1-1　微元管段

B.0.2　在实际应用中，对流加速项$v\frac{\partial H}{\partial x}$，$v\frac{\partial v}{\partial x}$和斜率项$v\sin\alpha$相对于其他项都是小项，可忽略不计，运动方程和连续方程可作简化计算。

运动方程按公式（B.0.2-1）计算

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{g}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial t}+\frac{f}{D}\frac{\mathrm{v}|\mathrm{v}|}{2g}=0 \qquad \text{（B.0.2-1）}$$

连续方程按公式（B.0.2-2）计算

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{a^2}{g}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial x}=0 \qquad \text{（B.0.2-2）}$$

附录 C　特征线法原理与计算步骤

C.0.1　将一维管道占据的空间域用空间步长 Δx 进行离散，同时将时间域用时间步长 Δt 进行离散，生成图 C.0.1-1 所示计算网格。图中横坐标 x 表示管道的空间坐标，空间步长划分出的节点分别为 $i-1,\ i,\ i+1$ 等表示；纵坐标 t 表示时间坐标，时间节点分别为 $j,\ j+1,\ j+2$ 表示，$t=0,\ \Delta t, 2\Delta t$ 的时间层分别对应于 $j,\ j+1,\ j+2$。

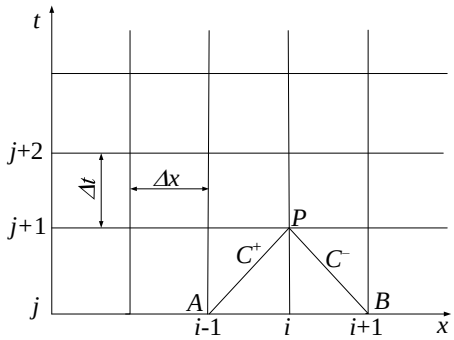


图 C.0.1-1　计算网格

设 A 点和 B 点处在时间层 j 上，A 点所在管道断面编号为 $i-1$，B 点为 $i+1$，P 点处在时间层 $j+1$ 上，所在管道断面编号为 i。A、P 两点连线确定特征线 C^+，B、P 两点连线确定特征线 C^-。

C.0.2　附录 B 中式（B.0.1-1）和式（B.0.1-2）是一组准线性双曲型偏微分方程，自变量为 x 和 t，因变量为 H 和 v。用流量 Q 来表示速度 v，由这两个方程可得到沿着特征线 C^+ 和 C^- 的方程：

$$C^+:\ \begin{cases} A^2\dfrac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}+A\dfrac{a}{g}\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}-QA\sin\alpha+\dfrac{faQ|Q|}{2gD}=0 \\ \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=+a \end{cases} \tag{C.0.2-1}$$

$$C^-:\ \begin{cases} A^2\dfrac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}-A\dfrac{a}{g}\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}-QA\sin\alpha-\dfrac{faQ|Q|}{2gD}=0 \\ \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-a \end{cases} \tag{C.0.2-2}$$

C.0.3　将上述方程采用一阶显式离散格式在 P 点进行时间离散，有：

$$C^+:\ A^2(H_P^{j+1}-H_A^j)+A\frac{a}{g}(Q_P^{j+1}-Q_A^j)-\Delta tQ_A^jA\sin\alpha+\frac{f\Delta x}{2gD}Q_A^j\left|Q_A^j\right|=0 \tag{C.0.3-1}$$

$$C^-:\ A^2(H_P^{j+1}-H_B^j)-A\frac{a}{g}(Q_P^{j+1}-Q_B^j)-\Delta tQ_B^jA\sin\alpha-\frac{f\Delta x}{2gD}Q_B^j\left|Q_B^j\right|=0 \tag{C.0.3-2}$$

C.0.4　给定水库、阀门和水泵等边界条件，给定 $t=0$ 时刻（对应于时间层 j）的初始条件，由式（C.0.3-1）和式（C.0.3-2）组成的方程组可解得 $t=\Delta t$（对应于时间层 $j+1$）的 Q_P^{j+1} 和 H_P^{j+1}。重复此过程，可解得所有空间节点在整个水力过渡过程历时中各时间节点上的流量和水头。

附录 D　水泵机组运动方程

D.0.1　水泵机组转速变化率与机组转动部分所承受的不平衡力矩成正比，符合如下关系：

$$M_{主} - M_{反} = I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \qquad \text{（D.0.1-1）}$$

$$I = \frac{GD^2}{4\mathrm{g}} \qquad \text{（D.0.1-2）}$$

式中：$M_{主}$ ——电动机的主动力矩，N·m;

$M_{反}$ ——流体反作用于叶轮的反力矩，N·m；

I ——包含叶轮内水体的机组转动部分的转动惯量，kg·m²;

ω ——角速度，rad/s；

$\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ ——角加速度，rad/s²;

t ——时间，s。

g ——重力加速度，m/s²;

GD^2 ——包含叶轮内水体的机组转动部分的飞轮力矩，N·m²。

D.0.2 水泵机组的动力矩与反力矩

正常运行中的水泵，来自电动机的主动力矩$M_{主}$等于反作用于叶轮的反力矩$M_{反}$，水泵呈等转速运转。电动机动力突然中断后，主动力矩为零，叶轮在流体反力矩$M_{反}$的作用下做减速运动，$M_{反}$随着时间而变化。在水力过渡过程计算中，对于不同时刻的$M_{反}$，可取每一计算时段初始时刻的力矩$M_{反}^0$（初始值为已知）和结束时刻的力矩$M_{反}^i$（待求值）的算术平均值：

$$-\frac{M_{反}^0 + M_{反}^i}{2} = \frac{GD^2}{4\mathrm{g}}\frac{\pi(n_i - n_0)}{30\Delta t} \qquad \text{（D.0.2-1）}$$

式中：n ——机组转速，r/min;

Δt ——计算用的时间步长，s;

下标 0 ——计算时间步的初始时刻;

下标 i ——计算时间步的结束时刻。

将方程（D.0.2-1）作为边界条件，与特征线方程联立，可计算得到时间步结束时刻的机组转速n_i。

附录 E　管道水头损失计算方法

E.0.1　管道总水头损失宜按下式计算：

$$h_z = h_f + h_j \tag{E.0.1-1}$$

式中：h_z ——管道总水头损失，m；

h_f ——管道沿程水头损失，m；

h_j ——管道局部水头损失，m。

E.0.2　管道沿程水头损失宜按下列公式计算：

1 塑料管及采用塑料内衬的管道，采用达西-魏斯巴赫公式计算：

$$h_f = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \tag{E.0.2-1}$$

式中：λ ——达西—威斯巴哈摩阻系数；

l ——管道长度，m；

D ——管道内径，m；

v ——管道内过水断面平均流速，m/s。

摩阻系数λ可按下式计算：

层流区（$\mathrm{Re} < 2000$）：

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}} \tag{E.0.2-2}$$

式中：Re ——雷诺数。

紊流水力光滑区、紊流水力粗糙过度区和紊流水力粗糙区（$\mathrm{Re} \geq 2000$），用柯列布鲁克—怀特公式计算：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0\log\left(\frac{\Delta}{3.7D} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}\right) \tag{E.0.2-3}$$

式中：Δ ——当量粗糙度，mm。

2 混凝土管及采用水泥沙浆内衬管道，采用谢才公式计算：

$$h_f = \frac{v^2}{C^2 R} l \tag{E.0.2-4}$$

$$C = \frac{1}{n} R^y \tag{E.0.2-5}$$

式中：C ——谢才系数；

R ——水力半径，m；

n ——粗糙系数；

y ——指数。

谢才系数C按下式计算：

当 $0.1 \le R \le 3.0$， $0.011 \le n \le 0.040$ 时，可按巴普洛夫斯基公式计算：

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R}\left(\sqrt{n} - 0.1\right) \qquad \text{（E.0.2-6）}$$

当 $R \le 0.5\text{m},\ n \le 0.02$ 时，可按曼宁公式计算：

$$C = \frac{1}{n}R^{1/6} \qquad \text{（E.0.2-7）}$$

3 钢管和铸铁管，采用海曾—威廉公式计算：

$$h_f = \frac{10.67q^{1.852}}{C_h^{1.852}D^{4.87}}l \qquad \text{（E.0.2-8）}$$

式中：q——流量，m^3/s；

C_h——海曾—威廉系数。

E.0.3 当量粗糙度 Δ、粗糙系数 n 和海曾—威廉系数 C_h 可采用试验实测值。没有试验实测值时，可根据管材种类按《室外给水设计标准》GB 50013—2018 附录 A 选用。

E.0.4 有压管道内水力瞬变过程比较剧烈时，上述用于计算沿程水头损失的恒定摩阻模型不能准确预测压力波变化过程，可采用非恒定摩阻模型来计算。非恒定摩阻模型可根据管道类型和管道内部水流变化情况等参考可靠资料选用。

E.0.5 管道局部水头损失宜按下式计算：

$$h_j = \sum \zeta \frac{v^2}{2g} \qquad \text{（E.0.5-1）}$$

式中：ζ——局部阻力系数，可根据管道局部结构或元件的类型、大小和流体流动方向等因素选用。

附录 F　水泵 Suter 曲线

F.0.1　图 F.0.1-1 给出了比转速 Ns＝77、90、110、297、537 和 953 的水泵 Suter 曲线。图中横坐标和纵坐标定义为：

$$\theta=\begin{cases}\arctan(\dfrac{\upsilon}{\alpha}) & \alpha\geq 0\\ \pi+\arctan(\dfrac{\upsilon}{\alpha}) & \alpha<0\end{cases} \tag{F.0.1-1}$$

$$WH(\theta)=\frac{h}{\alpha^2+\upsilon^2} \tag{F.0.1-2}$$

$$WM(\theta)=\frac{\beta}{\alpha^2+\upsilon^2} \tag{F.0.1-3}$$

$$h=H/H_r \tag{F.0.1-4}$$

$$\upsilon=Q/Q_r \tag{F.0.1-5}$$

$$\beta=M/M_r \tag{F.0.1-6}$$

$$\alpha=n/n_r \tag{F.0.1-7}$$

式中：H——扬程，m；

H_r——额定扬程，m；

Q——流量，m^3/s；

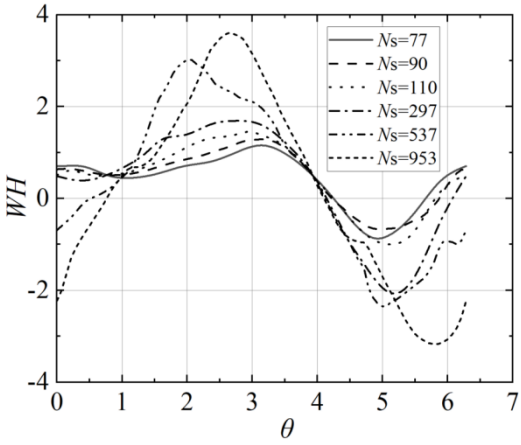
Q_r——额定流量，m^3/s；

M——转矩，N·m；

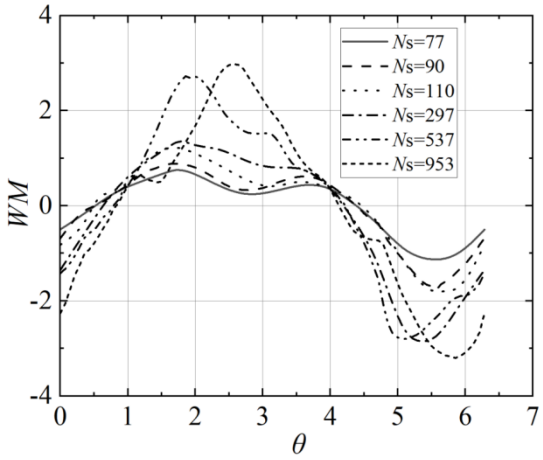
M_r——额定转矩，N·m；

n——转速，r/min；

n_r——额定转速，r/min。



（a）　WH-θ 曲线



(b)　*WM*-θ 曲线

图 F.0.1-1　六种比转速的水泵 Suter 曲线

F.0.2　当需要某个比转速泵的水泵 Suter 曲线时，可根据表 F.0.2-1 给出的数据通过插值计算获得。

表 F.0.2-1　六种比转速的水泵 Suter 曲线数据表

θ	*N*s=77		*N*s=90		*N*s=110		*N*s=297		*N*s=537		*N*s=953	
	WH	*WM*	*WH*	*WM*	*WH*	*WM*	*WH*	*WM*	*WH*	*WM*	*WH*	*WM*
0	0.705	-0.500	0.634	-0.684	0.506	-0.82	0.486	-1.35	-0.69	-1.42	-2.23	-2.26
0.2142	0.712	-0.299	0.64	-0.292	0.61	-0.594	0.414	-0.885	-0.418	-1.056	-1.314	-1.465
0.4284	0.689	-0.090	0.595	-0.053	0.536	-0.168	0.392	-0.424	-0.078	-0.573	-0.75	-0.921
0.6426	0.577	0.123	0.533	0.097	0.496	0.244	0.449	0.018	0.074	-0.232	-0.284	-0.457
0.8568	0.473	0.305	0.504	0.3	0.509	0.309	0.562	0.398	0.265	0.118	0.222	0.052
1.0710	0.444	0.441	0.522	0.522	0.561	0.642	0.712	0.695	0.553	0.574	0.616	0.558
1.2852	0.466	0.556	0.58	0.738	0.647	0.98	0.90	0.933	1.075	1.147	0.691	0.546
1.4994	0.524	0.665	0.662	0.837	0.765	1.166	1.168	1.141	1.929	1.839	0.930	0.512
1.7136	0.61	0.752	0.753	0.886	0.908	1.223	1.334	1.33	2.518	2.48	1.389	1.014
1.9278	0.695	0.699	0.832	0.838	1.065	1.141	1.37	1.306	2.948	2.687	1.919	1.512
2.1420	0.748	0.566	0.904	0.703	1.21	1.006	1.474	1.237	2.927	2.555	2.490	2.105
2.3562	0.8	0.42	0.996	0.52	1.31	0.85	1.61	1.18	2.64	2.11	3.225	2.77
2.5704	0.897	0.303	1.09	0.37	1.347	0.68	1.677	1.063	2.378	1.732	3.562	2.979
2.7846	1.021	0.246	1.204	0.329	1.405	0.527	1.69	0.93	2.209	1.533	3.54	2.713
2.9988	1.13	0.262	1.271	0.372	1.442	0.428	1.665	0.839	2.109	1.523	3.148	2.237
3.2130	1.147	0.323	1.281	0.486	1.343	0.419	1.548	0.806	1.86	1.386	2.542	1.826
3.4272	1.038	0.393	1.172	0.579	1.205	0.48	1.32	0.8	1.357	0.909	1.909	1.301
3.6414	0.846	0.436	0.942	0.617	0.96	0.496	1.028	0.734	0.927	0.734	1.31	0.84
3.8556	0.596	0.417	0.617	0.546	0.618	0.432	0.656	0.55	0.64	0.57	0.737	0.604
4.0698	0.291	0.302	0.240	0.36	0.273	0.328	0.136	0.236	0.191	0.278	0.082	0.161
4.2840	-0.062	0.107	-0.102	0.123	-0.066	0.182	-0.456	-0.176	-0.384	-0.175	-0.505	-0.403
4.4982	-0.44	-0.128	-0.342	-0.161	-0.429	-0.044	-0.97	-0.643	-0.972	-0.778	-0.872	-0.662
4.7124	-0.75	-0.401	-0.556	-0.372	-0.75	-0.376	-1.421	-1.261	-1.500	-1.56	-0.96	-0.73

4.9266	-0.876	-0.703	-0.670	-0.88	-0.944	-0.814	-1.839	-2.071	-2.29	-2.7	-1.5	-1.36
5.1408	-0.771	-0.954	-0.655	-1.25	-1	-1.274	-2.066	-2.69	-2.23	-2.8	-2.08	-2.08
5.3550	-0.525	-1.090	-0.570	-1.59	-0.899	-1.644	-1.955	-2.85	-2.05	-2.64	-2.65	-2.65
5.5692	-0.173	-1.128	-0.43	-1.77	-0.554	-1.803	-1.506	-2.741	-1.81	-2.34	-3.04	-3.04
5.7834	0.217	-1.073	-0.16	-1.52	-0.056	-1.785	-0.836	-2.374	-1.42	-2.00	-3.17	-3.17
5.9976	0.504	-0.892	0.295	-1.23	0.299	-1.558	-0.197	-1.926	-0.93	-1.90	-3.07	-3.09
6.2118	0.664	-0.605	0.62	-0.82	0.468	-1.026	0.324	-1.492	-0.92	-1.63	-2.59	-2.66

附录 G　水泵机组转动惯量计算方法

G.0.1　水泵机组的转动惯量等于电动机转动惯量与水泵转动惯量之和：

$$I = I_{\text{motor}} + I_{\text{pump}} \tag{G.0.1-1}$$

式中：I ——水泵机组转动惯量，$\text{kg}\cdot\text{m}^2$；

I_{motor} ——电动机转动惯量，$\text{kg}\cdot\text{m}^2$；

I_{pump} ——水泵转动惯量，$\text{kg}\cdot\text{m}^2$。

G.0.2　电动机转动惯量与水泵转动惯量可按下式估算：

电动机转动惯量：

$$I_{\text{motor}} = 118 \times \left(\frac{P}{n}\right)^{1.48} \tag{G.0.2-1}$$

水泵转动惯量：

$$I_{\text{pump}} = 1.5 \times 10^7 \times \left(\frac{P}{n^3}\right)^{0.9556} \tag{G.0.2-2}$$

式中：n ——水泵机组转速，r/min；

P ——水泵机组功率，kW。

附录 H　水锤波速计算方法

H.0.1　管道中的水锤波速应按式（H.0.1-1）计算：

$$a=\sqrt{\frac{K/\rho}{1+(K/E)(D/\mathrm{e})c_p}} \qquad \text{（H.0.1-1）}$$

式中：a ——水锤波速，m/s;

ρ ——水的密度，kg/m^3;

K——水的弹性模量，N/m^2；

E——管壁材料的弹性模量，N/m^2；

D——管道的内径，m；

e——管道壁厚，m；

c_p ——管材系数，均匀管 $c_p=1$，钢筋混凝土管 $c_p=(1+0.95a_0)$；

a_0 ——管壁环向含钢筋系数，其确定方法见《管道输水灌溉工程技术规范》GB/T 20203。

H.0.2　常见金属材料的弹性模量值选取按《工业金属管道设计规范》GB 50316 执行；埋地塑料管道和钢塑复合有压管道弹性模量值选取按《埋地塑料给水管道工程技术规范》CJJ 101 执行；混凝土管道的弹性模量选取按《混凝土结构设计规范》GB 50010 执行；预应力钢筋混凝土管道的弹性模量选取按《预应力钢筒混凝土管道技术规范》SL 702 执行。

附录 J　有压重力流输水系统计算工况

J.0.1 有压重力流输水系统正常开关阀时计算工况可按表 J.0.1-1 选择。

表 J.0.1-1　有压重力流输水系统正常开关阀时计算工况选择

编号	输水系统布置 / 工况	备注
G1	高位水池+干线管道+末端阀门+低位水池 / 正常开阀	重点关注开阀过快时出现的低压情况
G2	高位水池+干线管道+末端阀门+低位水池 / 关阀	重点关注关阀过快时出现的高压和低压情况，关阀规律需要整定
G3	高位水池+干线管道+阀门+大气出流 / 开阀	相比于工况 G1，需要注意管道出口边界条件为 p=0
G4	高位水池+干线管道+阀门+大气出流 / 关阀	相比于工况 G2，需要注意管道出口边界条件为 p=0
G5	有压取水口+干线管道+阀门+有压出水口 / 开阀	相比于工况 G1、G3，需要注意起点与终点的压力边界条件
G6	有压取水口+干线管道+阀门+有压出水口 / 关阀	相比于工况 G2、G4，需要注意起点与终点的压力边界条件
G7	干线管道+支线管道+支线阀门+干线阀门 / 干线阀门正常关闭，支线阀门正常关阀	需提前预设各阀门关闭规律，关注不同关阀方式导致的压力瞬变情况
G8	干线管道+支线管道+支线阀门+干线阀门 / 干线阀门关闭，支线阀门正常打开	需关注各支线阀门开启规律，以及各支线阀门开启时间间隔

J.0.2 有压重力流输水系统发生事故时的计算工况可按表 J.0.2-1 选择。

表 J.0.2-1　有压重力流输水系统发生事故时的计算工况选择

编号	输水系统布置 / 工况	备注
S1	干线管道+支线管道+支线阀门+干线阀门 / 事故紧急关阀，包含干线阀门关闭+各支线阀门单独关闭、同时关阀、依次关阀	需关注在不同关阀规律下的压力瞬变情况
S2	干线管道+支线管道+支线阀门+干线阀门 / 爆管+关阀	需预定爆管位置，整定距离最近的一个或两个阀门关闭规律，避免因关阀不合理导致压力过高而引起二次爆管

附录 K　泵送加压输水系统计算工况

K.0.1　泵送加压输水系统的事故断电水力过渡过程计算工况可按表 K.0.1-1 选择。

表 K.0.1-1　泵站事故断电计算工况选择（设计糙率系数）

工况编号	工况	备注
P1	出水池最高水位，进水池最低水位，最大扬程，*n* 台水泵事故断电，工作阀门正常关闭	机组最高反转转速，系统最大、最小水压
P2	出水池最低水位，进水池最高水位，最大扬程，*n* 台水泵事故断电，工作阀门正常关闭	系统最小水压
P3	出水池最高水位，进水池最低水位，最大扬程，*n* 台水泵事故断电，工作阀门全部拒动	机组最大反转转速，水泵出水管最小压力
P4	出水池最高水位，进水池最低水位，最大扬程，*n* 台水泵事故断电，工作阀门 n-1 正常关闭、1 台拒动	机组最高反转速度
P5	出水池最高水位，进水池最低水位，最大扬程，*n* 台水泵事故断电，工作阀门全部拒动	机组最高反转速度，系统最小压力
P6	出水池正常水位，进水池正常水位，*n* 台水泵运行，其中 1 台事故断电，工作阀门正常关闭	系统最大、最小水压
P7	出水池正常水位，进水池正常水位，*n* 台水泵运行，其中 1 台事故断电，工作阀门拒动	机组最高反转转速
P8	出水池正常水位，进水池正常水位，1 台水泵运行事故断电，工作阀门正常关闭	机组最高反转转速，系统最小水压
P9	出水池正常水位，进水池正常水位，1 台水泵运行事故断电，工作阀门拒动	机组最高反转速度，系统最小水压

K.0.2 泵送加压输水系统的事故断电最不利工况计算结果校核可按表 K.0.2-1 选择。

表 K.0.2-1　泵站事故断电最不利工况计算结果校核

工况编号	工况	备注
R1	最大反转转速工况	最小可能糙率系数
R2	最大水压工况	
R3	最小水压工况	
R4	最大反转转速工况	最大可能糙率系数
R5	最大水压工况	
R6	最小水压工况	

K.0.3 泵送加压输水系统的机组正常启停水力过渡过程计算工况可按表 K.0.3-1 选择。

表 K.0.3-1　泵站机组正常启停计算工况选择

工况编号	工况	备注
N1	出水池正常水位，进水池正常水位，设计扬程，*n*-1 台水泵运行，最	系统最大、最小水

	后 1 台水泵启动，工作阀门正常开启	压
N2	出水池正常水位，进水池正常水位，设计扬程，*n* 台水泵运行，逐台正常停机	系统最大、最小水压
N3	出水池最高水位，进水池最低水位，最高扬程，*n* 台水泵运行，逐台正常停机	系统最大、最小水压
N4	出水池最低水位，进水池最高水位，最低扬程，1 台水泵运行，正常停机	系统最大、最小水压
N5	出水池正常水位，进水池正常水位，设计扬程，*n* 台水泵逐台启动，工作阀门正常开启	系统最大、最小水压

附录 L　常用水锤防护措施

L.0.1 有压输水系统常用的在管路系统加装设备的水锤防护措施可按表 L.0.1-1 选择。

表 L.0.1-1　有压输水系统常用的在管路系统加装设备的水锤防护措施

编号	名称	类型	功能	针对水锤类型	适用条件
M1	缓闭阀	缓闭蝶阀 缓闭球阀/半球阀	通过整定缓闭阀的启闭规律来降低水锤压力波动，同时控制机组倒转。	正压水锤	大中型高扬程泵站。常见的执行机构有：重锤式、蓄能罐液控、电液控等。
M2	止回阀	多功能水泵控制阀	也称液力控制阀，依靠泵后的压力变化，靠水流的能量来自行启闭。在流量为 0 时快速关闭 95%左右，余下缓慢关闭。通过调节先导阀来调节启闭时间，从而达到控制水锤压力波动和机组倒转的目的。	正压水锤	小型泵站。
		快速止回阀	在流量为 0 时快速关闭，防止水倒流及机组倒转。		中、小型泵站及深井泵站。也称逆止阀，常与超压泄压阀、空气罐配合使用。
M3	空气阀	复合式空气阀	空管充水时大量排气；正常运行时排出水中微量掺气；水力过渡过程中产生负压时大量进气，压力回升大于大气压时大量排气。	负压水锤	管道局部高点、上坡段坡度减小折点、下坡段坡度增大折点、长平（斜）段。与注气微排阀同时安装时应在充水完成后关闭，否则容易引发弥合水锤。
		真空破坏阀	停机或泄水时破坏真空断流，快速进气，防止管道被吸扁。	负压水锤	虹吸高点，大管径管道的局部高点。
		注气微排阀	水力过渡过程中产生负压时大量快速进气，压力回升大于大气压时微量缓慢排气。	负压水锤和弥合水锤	管道局部高点、负压严重节点。
		缓冲空气阀	空管充水时大量排气；正常运行时排出水中微量掺气；水力过渡过程中产生负压时大量快速进气，压力回升时先大量排气，当达到切换压力时，大排气口关闭，微量缓慢排气。	负压水锤和弥合水锤	管道局部高点、负压严重的节点。但要注意能否在低压时快速实现大量排气向微量排气切换。
M4	调压室	双向	主管压力降低时调压室向主管注水，主管压力升高时向调压室泄水减压，有效减缓压力波动，填谷削峰。	负压水锤和正压水锤	大流量长管道水力系统，常利用现状高地。
		单向	主管压力降低时调压室向主管注水，预防水柱分离及断流弥合水锤；主管压力升高时连接管上的逆止阀关闭。	负压水锤	大流量长管道水力系统。
M5	空气罐	有囊	压力降低时，罐内气体膨胀向主	负压水锤和	小流量高扬程泵站。

		无囊	管注水；压力升高时，主管水流向罐内，罐内气体压缩。有效减缓压力波动，填谷削峰。	正压水锤	常与快速止回阀配合使用。
M6	超压泄压阀	高压开启（水击泄放阀）	压力升高到触发压力时，阀门开启泄水泄压。	正压水锤	高扬程泵站。可单独使用，减小正压水锤，也常作为后备防护设备。
		低压预先开启（压力波动预止阀）	事故断电压力降低至触发压力时，阀门提前开启泄水，预先泄压。	正压水锤（且无负压水锤）	高扬程且只存在正压水锤问题的泵站；不适用于负压问题严重的加压系统。
M7	惯性飞轮		防止在水泵停机时因水泵转速降低过快而引起的管道水锤压力波动过大，特别是对低压更加有效。	负压水锤和正压水锤	中、小型卧式离心泵。
M8	水锤爆破膜片		安装在水泵旁通管上，出现超过规定极限的水锤压力时爆破泄水泄压。	正压水锤	高扬程泵站。
M9	减压阀		通过调整阀门开度，令阀门出口压力恒定或阀门进出口压力成比例。	正压水锤	大落差重力流输水系统，常安装在减压池前。
M10	调流调压阀		通过调整阀门开度，达到系统要求流量；通过整定阀门启闭规律，降低压力波动幅度。	负压水锤和正压水锤	重力流输水系统末端或需要通过调压阀调节流量的泵站加压系统。
M11	旁通管		通过在主管侧设旁通管来分散泄水流量，减小主阀进出口压差，减小水锤压力，控制机组倒转。	正压水锤	大中型高扬程泵站和高落差长距离大口径重力流系统。
M12	拍门		安装在出水管道尾端，防止外水倒灌。		出水池水位高于出水管口、输水管道较短的中、小型泵站。

L.0.2 有压输水系统常用的改变管路参数的水锤防护措施可按表 L.0.2-1 选择。

表 L.0.2-1　有压输水系统常用的改变管路参数的水锤防护措施

编号	名称	功能	针对水锤类型	适用条件
U1	增大管径	通过增大管径来降低管内流速，从而减小压力波动幅度。	负压水锤和正压水锤	中小型泵站和小口径管道的重力流系统。
U2	降低管道中心高程	通过降低局部管中心高程，减小负压。	负压水锤	局部点负压较大。

附录 M　计算报告编写格式

M.0.1　封面

1　报告名称。

2　版次。

3　编写单位。

4　编写日期。

M.0.2　封二

1　项目名称。

2　项目负责人。

3　项目主要参加人。

4　报告编写人。

5　报告审查人。

M.0.3　摘要

M.0.4　目录

M.0.5　报告正文

1　前言。

2　工程概况：宜包括工程简要介绍、枢纽布置、工程规模及主要特点、水库水位参数、输水系统的平面布置图、沿管线纵剖面图，以及水道的断面形式、尺寸等参数、隧洞和管道的衬砌方式、材料及糙率、进/出水口、引水隧洞、岔管、压力钢管、渐变段、转弯段、尾水隧洞等形状参数及局部水头损失系数、调压室结构图、阀门几何参数及水头损失系数等；机组参数及性曲线等。

3　项目任务：介绍水力过渡过程计算的目的与要求。

4　计算模型与计算方法。

5　计算工况：对计算工况的选择理由、工况参数进行说明。

6　计算结果与分析：可分多章进行介绍。

M.0.6　结论与建议

M.0.7　参考文献和资料

本标准用词说明

1　为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2　条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《管道输水灌溉工程技术规范》GB/T 20203
《混凝土结构设计规范》GB 50010
《室外给水设计标准》GB 50013
《泵站设计标准》GB 50265
《工业金属管道设计规范》GB 50316
《水工隧洞设计规范》SL 279
《水利水电工程调压室设计规范》SL 655
《预应力钢筒混凝土管道技术规范》SL 702
《埋地塑料给水管道工程技术规范》CJJ 101

团体标准

有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护技术导则

T/CHES XXX-2023

条文说明

制定说明

《有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护技术导则》T/CHES***-2023，于****年**月**日由中国水利学会以 2023 年第**号公告批准发布。

本标准制定过程中，编制组进行了广泛深入的调查研究，总结了我国有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护的实践经验。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本导则时能正确理解和执行条文规定，编制组按章、节、条的顺序编制了本导则的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目　次

2　术语 ……37
3　基本规定 ……38
3.1　基础数据的获取 ……38
3.2　计算大纲制订 ……38
4　水力过渡过程计算模型 ……40
4.1　系统元件拓扑结构 ……40
4.3　边界条件 ……40
4.4　初始条件 ……40
4.5　计算参数 ……40
4.6　计算网格与时间步长 ……40
4.8　计算软件 ……41
5　水力过渡过程数值计算 ……42
5.3　数值计算 ……42
5.4　计算结果与处理 ……42
6　水锤防护措施 ……43
6.1　基本要求 ……43
7　计算成果与报告编制 ……44
7.1　计算成果 ……44
7.2　计算报告编制 ……44
附录 F　水泵 Suter 曲线 ……45
附录 J　有压重力流输水系统计算工况 ……46

2 术语

2.0.1 有压输水系统包括输水管道或涵洞线路上所有的建筑物、装置和设备，如水池、加压泵、阀门、调压室、空气阀和其他水锤防护装置。

2.0.2 水力过渡过程也称水力瞬变过程。这里采用了《抽水蓄能电站水力过渡过程计算分析导则》T / CEC 5010 的定义。

2.0.3 水锤又称水击，外界原因指能引起压力急剧变化的原因，如阀门突然开启、关闭、水泵机组突然停车等动作。

2.0.4 元件也称水力部件，常用元件包括水库（水池）、管段、阀门（闸门）、泵、空气阀、调压室等。其中，调压室分为单向和双向两类。

2.0.7 边界条件中的特性参数包括水库（水池）特征水位、流量、压力、机组力矩以及转速等。

2.0.8 特定工况如设计工况、初始工况等。常用于管网规划设计、管网宏观状态评估等。

2.0.9 瞬态工况常用于管网安全评价、优化调试等。

2.0.11 水力过渡过程计算包括泵站及有压输水系统所有元件在内的输水管网几何模型、拓扑结构、边界条件、初始条件、节点配置、时间步长，以及对输水管网系统中的元件瞬变参数包括流速、流量、压力、水泵机组转速等参数进行稳态工况及瞬态工况模拟的计算方法与计算结果存储系统。

2.0.14 对系统产生的不利影响包括最高压力与最低压力、液体汽化、机组反转等，水锤防护装置如调压室、空气阀、水锤消除器等。

2.0.17 时程线又称历程线，动态参数包括流量、压力、机组转速和力矩等参数。

2.0.21 惯性元件，如短接头以及水力系统的短管，在瞬变响应时弹性远不及惯性那样重要，可将液体质量当作固体来处理，包括摩擦阻力在内的所有作用力的牛顿运动方程可用来表示其非定常特性。

2.0.22 特征线法简称 MOC，是一种应用最广泛的输水系统水力过渡过程数值计算方法，被认为是欧拉方法中最精确的控制方程表示方法，但需要许多计算量求解典型瞬态管道流动问题。随着管道系统变得复杂，所需计算量显著增加。该方法自 20 世纪 60 年代开始流行，其代表人物是美国的 E B Wylie 教授。目前绝大多数水力过渡过程计算软件都是基于 MOC 编制的。

2.0.23 波特性法简称 WCM，也称波计划法（wave plan method，WPM），是近些年发展起来的一种输水系统水力过渡过程数值计算方法，可以看成是拉格朗日方法中的一种。该方法跟踪压力波在整个系统中的传播过程，并在固定时间间隔或实际发生变化的可变时间间隔对压力波导致的速度与压力变化进行计算。管线摩擦对压力波的影响通过使用非线性特征关系修改压力波来体现。由于 WCM 在时间和空间上都是连续的，因此该方法对网络结构和模拟过程的长度不敏感，从而提高了计算效率。该方法的代表人物是美国 D J Wood 教授。目前，KYPipe 等少数软件是基于 WCM 编制的。

3 基本规定

3.1 基础数据的获取

3.1.2 本条对有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护需要获取的基础数据及资料进行了规定，其中部分款的说明如下：

5 管道及元件的特性参数包括管道长度、直径、壁厚、糙率、材料弹性模量，阀门开度阻力曲线以及空气阀尺寸、进气系数和排气系数等。

6 水泵机组的主要参数包括型式、额定流量、额定扬程、额定转速、转动惯量。如果在可研等阶段无法确定水泵机组全特性曲线或 Suter 曲线时，可借助相近比转速泵的全特性曲线或水泵 Suter 曲线插值估算。

11 其它必需的相关文件包括工程调度运行原则、工程的近期及远期目标、执行的相关规范和标准等。

3.2 计算大纲制订

3.2.5 本条对瞬态工况计算方案编制提出了要求，相关要求为：

2 监视点为分析有压输水系统的瞬变特性，在瞬变计算时设置的监视点。

5 相关曲线包括管网压力包络线、指定位置的压力时程线、流量时程线和机组转速随时间的变化曲线等。

3.2.6 本条对水锤防护计算方案编制提出了要求，相关要求为：

2 主要瞬变过程包括：启泵、停泵、关阀、开阀及流量调节等瞬变过程。

3.2.7 本条对水锤防护控制标准提出了要求，相关要求为：

1 管道最高压力的控制值是基于《泵站设计标准》GB 50265 和《室外给水设计标准》GB50013 进行规定的。该规定兼顾了《水利水电工程压力钢管设计规范》SL/T 281 对有压重力输水系统给出的“最高压力不应超过正常静水压力的 1.5 倍”的要求。此外，《水利水电工程机电设计技术规范》SL 511 也有类似规定。这里的最高工作压力可以视为设计压力。在实际执行时，可按下列要求执行：

（1）对于泵送加压输水系统，管道最高压力与管道设计压力的比值按下列原则选取，当泵出口工作压力：

— 小于等于 100m 时，取 1.5 倍；

— 100m~300m 时，取 1.4 倍；

— 大于等于 300m 时，取 1.3 倍。

（2）对于有压重力流输水系统，管道最高压力与管道水流静止时压力的比值按如下原则选取，当管道出口静压：

— 小于 100m 时，取 1.5 倍；

— 100m~300m 时，取 1.4 倍；

— 大于等于 300m 时，取 1.3 倍。

2 在水力过渡过程中，有压输水系统最低压力在考虑海拔修正后应不宜低于 -4.0m。这一控制值是参考《泵站设计标准》GB 50265-2022 来规定的，《室外给水设

计标准》GB 50013-2018 中条文说明 7.3.6“最低压力应控制在-2.0m 以内，并明确该规定与现行国家标准 GB50265 相一致”，由于《泵站设计标准》GB 50265-2022 将此值修改为-4.0m，因此，本标准采用最新国家标准规定的-4.0m。年运行时间长或抗压能力低的管道应适当提高所允许的管道最低压力值。

对于采用虹吸断流措施的扬水系统，在水力过渡过程中驼峰处最低压力在考虑海拔修正后不宜低于-8.0m，这一控制值是在《泵站设计标准》GB 50265 规定的“正常运行工况下驼峰处真空度不应超过 7.5m 水柱高”的基础上，增加 0.5m 裕量得到的。

3　对于离心泵加压输水系统，事故停泵时水泵机组最高反转速度不应超过额定转速的 1.2 倍，超过额定转速的持续时间不应超过 2min。对于轴流泵和混流泵输水系统，水泵机组最高反转速度不应超过额定转速的 1.5 倍，超过额定转速的持续时间不应超过 2min。除此之外，水泵反转速度和持续时间还需要满足水泵厂家给出的相关要求。

4　水力过渡过程计算模型

4.1　系统元件拓扑结构

4.1.3　本条对系统元件拓扑结构提出了要求：

1　系统元件拓扑结构包括可能存在的上、下游水库（池）、输水管道（隧洞）、阀门、调压室、水泵机组和水锤消除器等元件。

4.3　边界条件

4.3.2　组成元件包括上、下游水库（池）、分叉管、串联管道、并联管道、工作阀门和水泵等，水锤防护元件包括空气阀、调流阀、调压室、空气罐、压力波动预止阀和水击泄放阀等。

14　其他特殊元件指为实现输水系统的一些要求而设置的元件，如特殊的水锤防护装置。

4.4　初始条件

4.4.1　主要水力参数包括沿程流量、压力、水位、各阀门的初始开度、水力机械的流量、转速和力矩等。

4.5　计算参数

4.5.4　由于电动机材料和制造工艺不断改进，电动机转动惯量在不断下降，采用附录G 计算得到的转动惯量经常比实际值大。为此，可根据已有准确结果的相近水泵机组转动惯量对计算得到的转动惯量进行修正，或者根据水泵机组的尺寸通过三维造型计算得到。此外，电机的转动惯量分为空载和最大负载转动惯量，水力过渡过程计算采用的是空载转动惯量，而不是最大负载转动惯量。

4.6　计算网格与时间步长

4.6.1~4.6.3　计算网格划分与时间步长选择实例：上游水库管端阀控出流如图 1 所示，恒定水位 H_0=150m，管长 L=5125m，管内径 D=0.5m。阀门全开时流量系数 $C_0=0.009$，部分开度流量系数即 $C=C_0\tau$，$\tau=\left(1-t/t_c\right)^{1.5}$，$\tau$为相对开度，关阀总历时 $t_c=21\text{s}$，分析管内瞬变流特性。波速 a=1200m/s，水力损失系数 f=0.018。

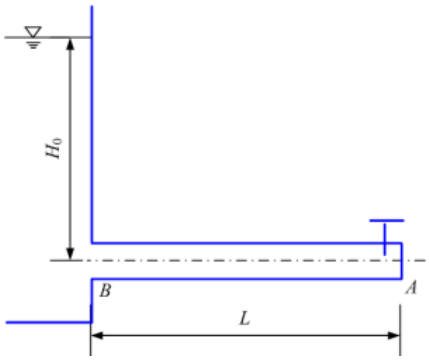


图 1　管道布置示意图

解：采用附录 B 中所述有压输水系统管网系统计算模型的基本控制方程进行计算，计算方法采用附录 C 中所述的特征线法。初始条件根据伯努力方程可以计算初始流速。边界条件：上游水库水位恒定 H_0=150m。

时间步长选取需要考虑条件：计算稳定性要满足库朗条件；满足一定的精度要求；阀门关闭规律的真实性；最好做时间步长的无关性分析；管道分段数圆整性。因此，时间步长选取应满足调整波速法 $NN_j = L_j / [a_j(1+\varphi_j)\Delta t]$，分析时间步长对计算结果的敏感性，采用的时间步长$\Delta t$ 分别为 0.1s、0.01s、0.005s 三种不同方案，如表 1 所示。

表 1 波速调整方案

方案	Δt/s	实际波速/(m/s)	调整后波速/(m/s)	Δx /m	分段数
a	0.1	1200	1116.288	111.6288	46
b	0.01	1200	1200.234	12.00234	427
c	0.005	1200	1200.234	6.00117	854

三种不同时间步长方案关阀瞬变特性分析如图 2~图 4。由图 3 可知方案 b 与方案 c 阀门前压力变化基本重合，说明时间步长Δt=0.01 即可满足要求，方案 b 为最优方案。

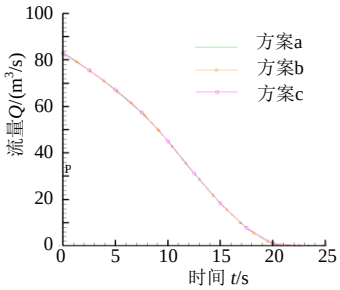


图 2 流量变化趋势

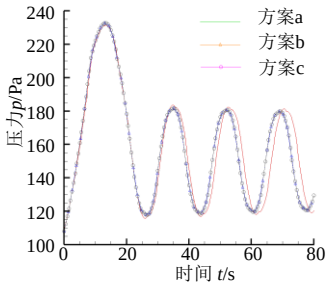


图 3 阀门前压力变化趋势

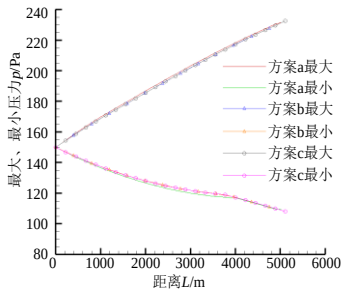


图 4 压力包络线图

4.8 计算软件

4.8.4 关键元件的特性参数在工程调试时进行实测。实测的元件一般包含水泵、止回阀、减压阀、泄压阀和调流阀等。

5　水力过渡过程数值计算

5.3　数值计算

5.3.1　计算软件包括商业软件以及自行开发的软件。软件需要经过实际输水工程验证。

5.4　计算结果与处理

5.4.1　数据处理软件包括商业软件及自行开发软件。其中部分款说明如下：

4　机组主要动态参数的变化过程曲线主要包括转速变化曲线、流量变化曲线以及力矩变化曲线等。

6　其他曲线包括调压室液面变化曲线、空气罐容积变化曲线以及阀门开闭曲线等。

6　水锤防护措施

6.1　基本要求

6.1.3

2　“超压泄压阀的泄压值可采用最大静压力加 10%~20%”的规定主要适用于静压较大的输水系统，当静压低于 0.5MPa 时，也可采用加 0.10MPa～0.20MPa 的做法。

4　进气排气阀是水锤防护设置之一，对管道中的负压具有较好的防护功能。该条款规定了进气排气阀的设置原则，与《城镇供水长距离输管（渠）道工程技术规程》CECS 193 基本一致。

7 计算成果与报告编制

7.1 计算成果

7.1.2 整个管网系统的压力包络线包括：未加水锤防护措施之前管网系统的最高压力线及最低压力线，加水锤防护措施之后的整个水力系统的最高压力线及最低压力线。

7.2 计算报告编制

7.2.1 计算结果与分析包括未加水锤防护措施与施加水锤防护措施的计算结果对比分析。

附录 F　水泵 Suter 曲线

F.0.1　本附录给出的 6 条水泵 Suter 曲线均来自于实验。其中，比转速 90、537 和 953 的曲线来自于 E B Wylie 等编著的《Fluids Transients》；比转速 77、110 和 297 的曲线来自于刘光临等发表在《水利学报》的论文“水泵全性能曲线的计算机仿真”。

附录 J　有压重力流输水系统计算工况

J.0.2　在 S2 工况中，爆管是非常工况，水锤防护控制值与其他工况不同，最大降压允许液体汽化，最大升压以不引起二次爆管为原则。