

ICS 23.080

CCS P 60

团 体 标 准

T/CHES XXX—2022

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**

（征求意见稿）

2022-XX-XX 发布

2022-XX-XX 实施

中国水利学会 发布

前言

根据中国水利学会团体标准编制工作安排，按照 SL1-2014《水利技术标准编写规定》的要求，制订《有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护技术导则》。

本标准的主要技术内容是：总则、术语、基本规定、水力过渡过程计算模型构建、水力过渡过程数值计算、水锤防护措施、计算成果与报告编制。

本标准批准部门：中国水利学会

本标准主持机构：中国水利学会

本标准主持单位：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、哈尔滨大电机研究所、中国灌溉排水发展中心、长江设计集团有限公司、浙江省水利水电勘测设计院、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、浙江省水利学会、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：*****

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

目次

1	总则	4
2	术语	5
3	基本规定	7
3.1	基础数据获取	7
3.2	计算大纲制订	7
4	水力过渡过程计算模型构建	9
4.1	系统元件拓扑结构构建	9
4.2	基本方程与求解方法	9
4.3	边界条件和初始条件设置	9
4.4	计算参数的确定	10
4.5	计算网格划分与时间步长选择	10
4.6	计算监视点的确定	10
4.7	计算软件的选择与使用	10
5	水力过渡过程数值计算	12
5.1	计算目的	12
5.2	计算方案与计算工况	12
5.3	数值计算	12
5.4	计算结果分析与处理方法	12
6	水锤防护措施	14
7	计算成果与报告编制	15
7.1	计算成果	15
7.2	计算报告编制	15
附录 A	有压输水系统计算模型的基本控制方程	16
附录 B	特征线法	18
附录 C	水泵全特性曲线的获取	22
附录 D	恒定摩阻和非恒定摩阻计算公式	23
附录 E	波速计算方法	24
附录 F	库朗条件	25
附录 G	调整时间步长的方法	26
附录 H	计算网格划分与时间步长选择实例	28
附录 I	有压重力流输水系统计算工况	29
附录 J	泵送加压输水系统计算工况	30
附录 K	常用的水锤防护措施	32
	条文说明	34

1 总则

1.0.1 为规范有压输水系统水力过渡过程计算方法、水锤防护装置选择和相关技术要求，使计算成果能够有效用于指导水锤防护，保障有压输水系统安全稳定运行，特制定本标准。

1.0.2 本标准适用于有压输水系统的稳定流动计算、瞬变流动计算和水锤防护装置的优选及效果分析。

1.0.3 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规范和标准的规定。

1.0.4 本标准适用于新建、改建和扩建的有压输水系统。

1.0.5 本标准主要引用下列标准。其中，不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

1. GB 50265 泵站设计规范
2. GB 50013 室外给水设计标准
3. GB/T 20203 管道输水灌溉工程技术规范
4. SL 430 调水工程设计导则
5. SL 279 水工隧洞设计规范
6. SL 511 水利水电工程机电设计技术规范
7. SL 655 水利水电工程调压室设计规范
8. SL/T281 水利水电工程压力钢管设计规范
9. CECS 193 城镇供水长距离输水管（渠）道工程技术规程
10. T/CEC 5010 抽水蓄能电站水力过渡过程计算分析导则
11. DL/T 5186 水力发电厂机电设计规范
12. NB / T 10072 抽水蓄能电站设计规范

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，包括输水管道或涵洞线路上所有的建筑物、装置和设备，分为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

有压输水系统中因水流速度急剧变化所引起的流动状态瞬变过程。

2.0.3 水锤 water hammer

由于某种外界原因使输水系统中水的流速突然发生改变，从而引起压力急剧变化的现象。

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变工况下的流动计算而设置的计算点位置。是连接各元件的公共位置，是组成输水管道拓扑结构的基础。

2.0.6 拓扑结构 topological structure

组成有压输水系统各元件链接的关联性。

2.0.7 边界条件 boundary condition

有压输水系统各元件在输水系统运行期间的已知的管道、水工设施及设备特性参数信息。

2.0.8 稳态工况 steady condition

有压输水系统中主要流动参数保持不变状态的一个特定工况。

2.0.9 瞬变工况 transient condition

有压输水系统从某一稳定工况到另一稳定工况的过渡过程。

2.0.10 瞬变流 transient flow

瞬变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

计算有压输水系统及其各元件的动态参数随时间变化的情况。

2.0.12 输水系统水力参数 hydraulic parameters of water transmission systems

特定工况下输水系统及其各元件的水力学参数。

2.0.13 泵全特性曲线 full characteristic curves of pump

以流量、转速为坐标，在四个象限内分别给出的水泵、制动、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。

2.0.14 泵 Suter 曲线 Suter curves of pump

根据量纲和相似原理建立的水泵扬程和转矩与流量转速组合参数间的全特性曲线，包括扬程特性曲线和转矩特性曲线。

2.0.15 水锤防护装置 protection device of water hammer

以消减有压输水系统水锤发生对系统运行产生不利影响为目的的装置。

2.0.16 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,也称水柱拉断。

2.0.17 管道最高压力上升率 maximum pressure rise rate of pipeline

管道压力波动的峰值与当地水力过渡过程发生前最近时刻的稳态工作压力的比值。

2.0.18 时程线 time line

描述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。

2.0.19 压力包络线 pressure envelope

在输水管道水力过渡过程期间出现的由最大压力线与最小压力线所包围的封闭曲线。

2.0.20 水锤防护标准 protection standard of water hammer

所允许的有压输水系统管道及元件的工作参数范围,是调整水锤防护措施时输水系统应满足的水力过渡过程限制性参数。

2.0.21 计算模型率定 computational model calibration

通过调整计算模型参数、基础数据、元件特性参数,基于特定的有压输水系统及其水锤防护装置,使水力过渡过程计算结果具有正确性,状态变量(压力、流量等)计算值与实测值的误差在可接受范围内的过程。

2.0.22 管道静压 static pressure of pipe

有压重力输水系统在水静止时的管道压力值,即管道上游正常水位(管道口为淹没进水)与压力管道末端断面中心高程之差。

2.0.23 监视点 monitoring point

在有压输水系统的管道上设置的特定位置,用于储存计算过程中的中间数据及结果数据。

3 基本规定

3.1 基础数据获取

3.1.1 为满足有压输水系统水力过渡过程计算与水锤防护需要，应获取下列基础数据及资料：

- 1 工程概况、工程任务和等级。
- 2 输水系统平面布置图、纵剖面图、横剖面图。
- 3 进水池与出水池特征水位。
- 4 当地海拔高程、空化压力、气温等参数。
- 5 输水系统管道及元件的物性参数与特性曲线。
- 6 水泵机组的主要参数及特性曲线。
- 7 水锤防护装置的性能参数及特性参数。
- 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方式下的边界条件和初始条件。
- 10 水力过渡过程控制标准。
- 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，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方案编制、瞬态工况计算方案编制、水锤防护计算方案编制三部分内容。

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，应通过稳态工况计算得到。
- 2 依据计算工况，确定满足计算目的的计算模型，设置边界条件，布置监视点，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的运行范围。
- 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。工况选择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，确定持续时长，确定计算结果的输出内容及方式。
- 3 计算采用的时间步长满足库朗条件要求。

- 4 计算中设置的监视点位置落在压力或流量最不利的位置附近。监视点数量覆盖典型节点。
- 5 计算结果包括瞬变工况的相关曲线。

3.2.6 水锤防护计算方案编制应符合下列要求：

- 1 计算工况结合 3.2.5 条选择水锤计算方案。
- 2 水锤防护计算的内容包括主要过程的水锤防护分析。
- 3 所选择的水锤防护装置易于施工和维护，便于运行管理、经济性好，与工程等级相匹配。
- 4 水锤防护最优方案应与水锤防护装置布置方案、水锤防护标准及防护装置的技术条件结合进行。

5 水锤防护标准应符合下列规定：

(1) 管道最高压力应满足如下要求：

a、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如下原则选取，当泵出口工作压力：

- 小于等于 100m 时，取 1.5 倍；
- 100~300m 时，取 1.4 倍；
- 大于等于 300m 时，取 1.3 倍。

b、对于有压重力流输水系统，管道最高压力与管道静压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；
- 100~300m 时，取 1.4 倍；
- 大于等于 300m 时，取 1.3 倍。

(2) 管道最低压力（通常发生在管道顶部）在考虑海拔修正后应不低于-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，其驼峰处最低压力在考虑海拔修正后不宜低于-8.0m。

(3) 对于泵送加压输水系统，水泵机组反转转速值小于额定转速的 1.2 倍，持续时间不超过 2min；

(4) 整个输水管网系统在任何情况下都不出现液体汽化现象。

4 水力过渡过程计算模型构建

4.1 系统元件拓扑结构构建

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性和几何位置，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 特性上渐变管系可采用一段跨越这些小的不连续段的当量均匀管近似。
- 4 当管长小于波长的 4% 时，管系中的短管可采用惯性元件，弹性极好的元件可采用容性（弹性和可压缩性）元件处理。

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 A 所列方程建模。

4.2.2 计算模型求解方法宜采用附录 B 所列方法或其它高精度的一维水动力学数值计算方法。

4.2.3 计算数值格式应满足相容性、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 水泵机组的转速求解应采用机组的运动方程。

4.3 边界条件和初始条件设置

4.3.1 初始条件应包含瞬变过程开始前稳定工况下整个水力系统的主要参数，并按稳定工况对整个输水系统进行水力计算。计算结果应作为瞬变计算的初始条件。

4.3.2 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。

4.3.3 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、流入与流出相等的边界条件设置。
- 5 管道给定摩阻系数及局部损失系数。
- 6 管线阀门给定阀门开度与局部阻力系数的关系曲线。
- 7 泵给定转速与流量、扬程、力矩关系以及泵组转动惯量，水泵的参数变化通过离散点的全特性曲线给定，当无法提供全特性曲线按附录 C 方法给定。

- 8 空气罐应给定罐内气体类型、初始压力、容积、及进出口水力损失系数。
- 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、阀门的关闭特性以及预止阀弹簧系数。
- 11 水击泄放阀给定设计初始开阀压力、动作时间。
- 12 空气阀给定阀门进排气口径、进排气流量系数性能曲线。
- 13 调压塔给定断面面积与进出口阻力系数。
- 14 其他特殊的元件按元件的流动特性要求给定。

4.4 计算参数的确定

4.4.1 摩阻系数的确定可采用附录 D 给定。

4.4.2 波速应按附录 E 确定。

4.5 计算网格划分与时间步长选择

4.5.1 计算模型网格划分与时间步长应满足附录 F 所示库朗稳定条件。

4.5.2 当管道较短，无法满足库朗条件时，应采用调节波速或管长的方式以使其满足库朗条件。

4.5.3 管道空间网格步长的确定，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 复杂管道水力系统在满足该要求存在困难时，可采用附录 G 给出的近似方法选取统一时间步长。

4.5.4 计算网格划分与时间步长实例可见附录 H。

4.6 计算监视点的确定

4.6.1 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。

4.6.2 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、局部最高点、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。

4.7 计算软件的选择与使用

4.7.1 开展水力过渡过程计算所采用的计算软件，应是已经通过正规手续效验和率定，并已获得软件证书备案。

4.7.2 可通过加密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。若加密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。

4.7.3 在开展过渡过程计算前，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分别针对输水系统的管道粗糙度与阻力系数、相关液体介质的水锤波速、阀门特性参数、空气阀特性参数、水泵性能曲线等主要元件进行。

4.7.4 元件特性参数率定应符合下列规定：

- 1 在具备试验条件的情况下，应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。

4.7.5 对于重要输水工程,宜有 2-3 家计算单位同时计算,相互印证,以保证计算结果的可靠性。

5 水力过渡过程数值计算

5.1 计算目的

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、管道疲劳与爆管可能性评估、水锤防护措施的选择、系统运行方式的确定、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 水力过渡过程计算成果，可为输水系统的管线和水工建筑物的设计依据。

5.2 计算方案与计算工况

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 计算工况包括未加水锤防护装置时工况。
- 4 计算工况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 I，泵送加压输水系统计算工况见附录 J。

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 计算结果分析与处理方法

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 整个管网的最高 / 最低压力包络线。
- 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 水泵机组的转速变化过程曲线。
- 5 水泵出口工作阀门关闭规律。
- 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。

6 水锤防护措施

6.0.1 有压输水系统宜安装下列防水锤装置：

1 在泵站出水总管起端，设置具有两阶段关闭功能的缓闭阀或轴流止回阀。在有压重力流输水管道末端（或者中部）设置具有两阶段关闭功能的缓闭阀或调流调压阀。

2 在泵站出水总管起端、有压重力流输水管道末端的关闭阀上游，可视需要设置超压泄压阀。超压泄压阀的公称直径宜取为主管道直径的 $1/5\sim 1/4$ 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使用压力加 $0.15\sim 0.20\text{MPa}$ 。

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 一般情况下，在输水管道上宜每隔 1.0km 左右设置进气排气阀。当输水管道坡度小于 1% 时，宜每隔 $500\text{m}\sim 800\text{m}$ 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确定。进气排气阀的口径宜取输水管道直径的 $1/12\sim 1/5$ ，或经计算确定。排气阀有效排气口径不得小于其公称直径的 70% ，或者阀体内通过气体的最小流道截面积不得小于公称尺寸的截面积。当管道压力较大或工况复杂时，应采用具有缓冲功能的排气阀。进气排气阀可采用一体化复合式空气阀，也可采用单独的进气阀与排气阀。

6.0.2 当计算结果不满足所规定的水锤防护标准时，宜按以下方法设置水锤防护装置：

- 1 重新整定工作阀门启闭规律。
- 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塔。
- 4 在可能出现压力过低的位置设置单向调压塔（池）。
- 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、增加水泵电机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 随着新技术发展出现的新型水锤防护装置。

6.0.3 水锤防护可采用附录 K 给定的措施。

6.0.4 采用的水锤防护措施初步方案，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，然后通过对不同水锤防护措施进行技术经济比较，推荐安全、经济、成熟的防护措施作为最优方案。

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，必要时对数学模型参数进行敏感性分析。
- 3 计算结果包括稳态工况下水力学参数分布、瞬态工况下常规分析/防护措施对比分析。
- 4 推荐的水锤防护措施和防护效果分析。

7.1.2 应绘制表征下列关系图表：

- 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、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、后压力变化规律曲线。
- 5 有调压塔、空气罐防护措施时，调压塔、空气罐的水位变化规律。
- 6 水泵出口工作阀门的启闭规律。
- 7 增加水锤防护措施前后最不利点压力最高值、最低值、最大反转转速、最大反转流量相对变化率等主要参数的对比说明。

7.2 计算报告编制

7.2.1 计算报告应包括下列内容：

- 1 报告章节目录。
- 2 前言、工程概况、基本资料、计算目的与内容、计算模型与计算方法、计算工况、计算结果与分析。
- 3 水锤防护措施及防护效果分析。
- 4 计算结果可靠性和合理性分析，必要时对数学模型参数进行的敏感性分析。
- 5 结论与建议。
- 6 采用图表、电子文档等方式，表征计算结果。

附录 A 有压输水系统计算模型的基本控制方程

A.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 A.0.1-1 所示。

运动方程按公式 (A.0.1-1) 计算。

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

连续方程按公式 (A.0.1-2) 计算。

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

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/s²。

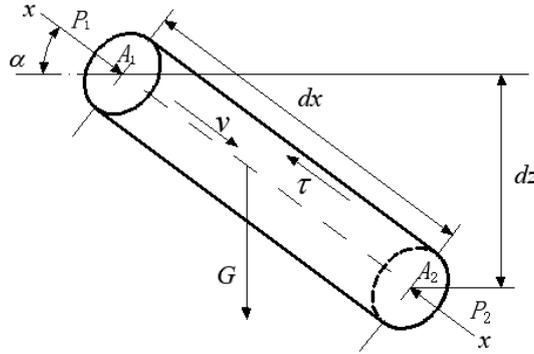


图 A.0.1-1 微元管段

A.0.2 在实际应用中，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 (A.0.2-1) 计算

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

连续方程按公式 (A.0.2-2) 计算

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

附录 B 特征线法

B.0.1 附录 A 中式 (A.0.2-1) 和式 (A.0.2-2) 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 。将运动方程与连续方程分别用 L_1 和 L_2 表示

$$L_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + f \frac{v|v|}{2D} = 0 \quad (\text{B.0.1-1})$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (\text{B.0.1-2})$$

引入一个变量 λ 将 L_1 和 L_2 方程进行线性组合, 可得

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{g}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \lambda \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + f \frac{v|v|}{2D} = 0 \quad (\text{B.0.1-3})$$

若 $H = H(x, t)$, $v = v(x, t)$, 那么它们的全导数为

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (\text{B.0.1-4})$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (\text{B.0.1-5})$$

对比式 (B.0.1-3)、式 (B.0.1-4) 和式 (B.0.1-5) 可知, 如果令

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{g} \quad (\text{B.0.1-6})$$

式 (B.0.1-3) 可以写成式 (B.0.1-7) 的全微分方程

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} = 0 \quad (\text{B.0.1-7})$$

由式 (B.0.1-7) 可解得 λ 的两个特征值

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (\text{B.0.1-8})$$

再将 λ 的两个值代入式 (B.0.1-6) 可得

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (\text{B.0.1-9})$$

当 $\frac{dx}{dt} = a$ 时, 式 (B.0.1-7) 可以写成 $\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} = 0$ 。当 $\frac{dx}{dt} = -a$ 时, 式 (B.0.1-

7) 可以写成 $-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} = 0$ 。将这两组方程分别用 C^+ 和 C^- 来表示

$$C^+ \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases} \quad (\text{B.0.1-10})$$

$$C^- \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \quad (\text{B.0.1-11})$$

如图 B.0.1-1 在 $x-t$ 平面内，式 (B.0.1-10) 代表斜率为 a 的 AP 线，式 (B.0.1-11) 代表斜率为 $-a$ 的 BP 线，为特征线。表示扰动在 $x-t$ 平面中传播的路径。 t_0 时刻在 A 点的扰动，将沿直线 AP 传播，在 Δt 时间后传播到 P 点。 t_0 时刻在 B 点扰动将沿直线 BP 传播，在 Δt 时间后传播到 P 点。

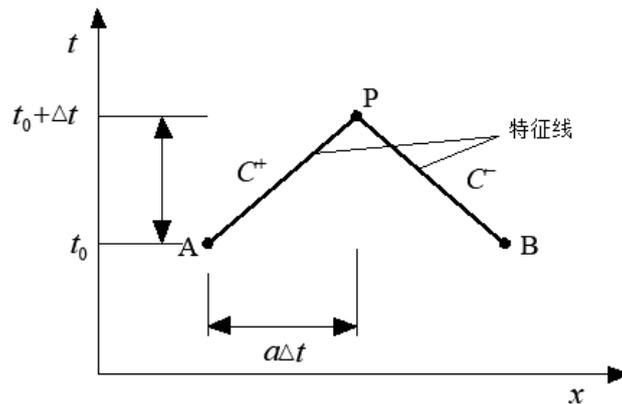


图 B-1 $x-t$ 平面特征线

将 C^+ 式 (B.0.1-10) 中的速度 v 乘以管道的面积，改写成流量形式的微分方程。将微分方程沿特征线 C^+ 从 A 点到 P 点进行积分，可得

$$\int_A^P dH + \frac{a}{gA} \int_A^P dQ + \frac{fa}{2gDA^2} \int_A^P Q|Q| dt = 0 \quad (\text{B.0.1-12})$$

式中： Q —流量， m^3/s 。

式 (B.0.1-12) 中的前两个积分比较容易求解，但代表摩阻损失的第三项积分，无法给定变量 Q 关于时间 t 的表达式。所以采用一阶近似的方法估计第三项的数值。并将 $dx = a dt$ 代入，可得

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f \Delta x}{2gDA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (\text{B.0.1-13})$$

将微分方程沿特征线 C^- 从 B 点到 P 点进行积分，同理可得

$$H_P - H_B + \frac{a}{gA}(Q_P - Q_B) + \frac{f \Delta x}{2gDA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (\text{B.0.1-14})$$

式中：下标 P、A、B—相应点的参数。

Δx —微元管段长度，m。

将式 (B.0.1-13) 和式 (B.0.1-14) 中 H_P 移到等号的右边可得

$$C^+ : H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_A |Q_A| \quad (\text{B.0.1-15})$$

$$C^- : H_P = H_B + B(Q_P + Q_B) + RQ_B |Q_B| \quad (\text{B.0.1-16})$$

式中， B —常数。
$$B = \frac{a}{gA};$$

R —常数。;
$$R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2}。$$

B.0.2 图 B.0.2-1 为特征网格，从图中可知，对于任意中间网格节点 i 处的水头 H 和流量 Q 都可由式 (B.0.1-15) 和式 (B.0.1-16) 联立求解。将上式各项进行合并整理得

$$C^+ : H_{Pi} = C_P - BQ_{Pi} \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$C^- : H_{Pi} = C_M + BQ_{Pi} \quad (\text{B.0.2-2})$$

式中，
$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1} |Q_{i-1}|;$$

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1} |Q_{i+1}|。$$

由式 (B.0.2-1) 和式 (B.0.2-2) 联立求解可得

$$H_{Pi} = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (\text{B.0.2-3})$$

$$Q_{Pi} = \frac{C_P - C_M}{2B} \quad (\text{B.0.2-4})$$

在求解过程中，对于上游边界节点仅存在 C^- 特征方程，下游边界节点仅存在 C^+ 特征方程，一个方程中存在水头 H 和流量 Q 两个未知数无法求解，所以需要根据实际情况建立相应边界条件方程，与特征方程进行联立求解，计算得到上下游边界处水头 H 和流量 Q 值。

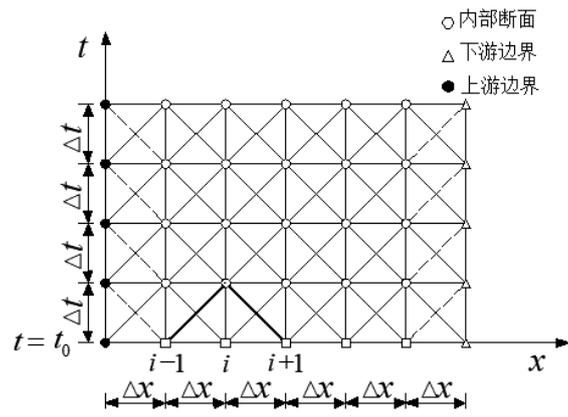
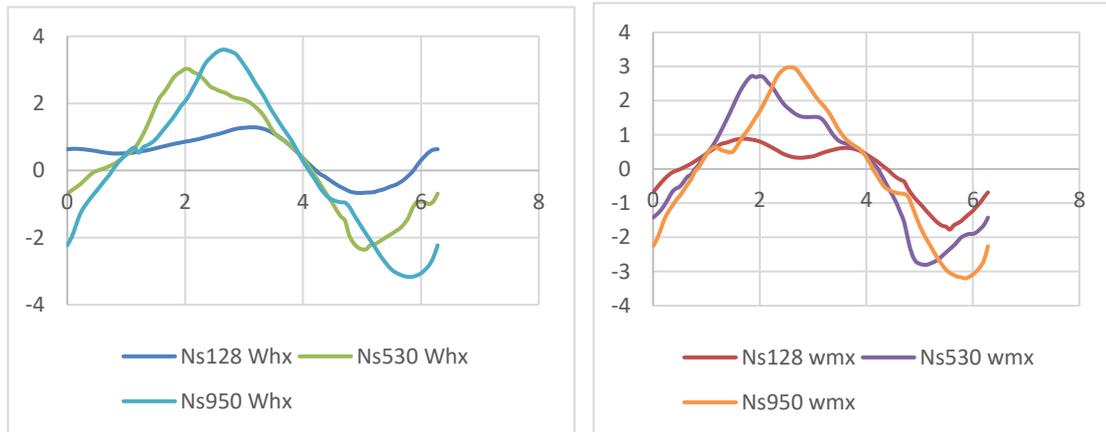


图 B.0.2-1 特征网格

附录 C 水泵全特性曲线的获取

C.0.1 图 C.0.1-1 给出了比转速 128、530、950 的三种水泵的 Suter 全特性曲线，当无法获得水泵的全特性曲线时，可采用相似的比转速的全特性曲线，或者进行线性插值获得相应的 Suter 曲线。



(a) Whx 曲线

(b) Wmx 曲线

图 C.0.1-1 三种比转速的 Suter 全特性曲线

附录 D 恒定摩阻和非恒定摩阻计算公式

D.0.1 在稳态工况下,不同管材的输水管道水头损失,应根据其糙率按现行国家标准《室外给水设计规范》(GB50013)规定的公式计算。

D.0.2 对于瞬变工况,可采用定常流动的摩阻系数进行水头损失计算,假设瞬时管壁剪切应力(即瞬时摩阻)与定常流动时的摩阻相等,恒定摩阻 J_q 按式(D.0.2-1)计算:

$$J_q = \frac{fv|v|}{2D} \quad (\text{D.0.2-1})$$

式中, f —达西-威斯巴哈摩擦系数,可按下式计算:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}, \quad \text{Re} \leq 2320 \quad (\text{D.0.2-2})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\Delta/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right), \quad \text{Re} > 2320 \quad (\text{D.0.2-3})$$

Δ —绝对粗糙度, m;

D —管道内径, m。

D.0.3 在瞬变比较剧烈的情况下,恒定摩阻模型不能准确预测压力波衰减和波形畸变过程,瞬变流中的瞬时摩阻可以用恒定摩阻和非恒定摩阻之和来表征。总的摩阻 J 按式(D.0.3-1)计算:

$$J = J_q + J_u \quad (\text{D.0.3-1})$$

式中, J_u —非恒定摩阻:

$$J_u = \frac{k}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + a \text{sign}(v) \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (\text{D.0.3-2})$$

式中, k —摩擦系数,根据剪切衰减系数 C^* 计算:

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (\text{D.0.3-3})$$

$$C^* = \begin{cases} 0.00476 & \text{当 Re} < 2320 \\ \frac{12.86}{\text{Re}^{\lg(\frac{15.29}{\text{Re}^{0.0567}})}} & \text{当 Re} \geq 2320 \end{cases} \quad (\text{D.0.3-4})$$

附录 E 波速计算方法

E.0.1 对地埋管，波速为：

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (K/E)(D/e)c}} \quad (\text{E.0.1-1})$$

$$c = \frac{2Ee}{GD + 2Ee} \quad (\text{E.0.1-2})$$

式中， ρ —流体的密度， kg/m^3 ；

K —水的弹性模量， N/m^2 ；

E —管壁的弹性模量， N/m^2 ；

e —衬砌的厚度， m ；

D —管道的直径， m ；

G —岩石的刚度模量， N/m^2 。

附录 F 库朗条件

F.0.1 库朗条件为

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{a} \quad (\text{F.0.1-1})$$

式中, Δt —时间步长, s;

Δx —分段长度, m;

a —波速, m/s。

为了保证计算结果稳定,有时需对管长进行微量调整,使其满足库朗条件。

附录 G 调整时间步长的方法

G.0.1 空间网格步长选择原则：

- 1 各管段的网格步长与波速比值应相等，即 $\Delta t = \frac{\Delta x_j}{a_j}$
- 2 各管段的网格段数应为整数，即 $\frac{L_j}{\Delta x_j} = \text{整数}$

由此可知， $\frac{L_j}{a_j \Delta t} = \text{整数}$

实际中为了满足上式，有可能使 Δt 和 Δx_j 选得很小。太细网格将增加大量计算机时。

G.0.2 复杂管道水力系统要满足原则 2，通常难以找到，因此，可采用近似选取统一时间步长 Δt 方法：

- (1) 传统的插值特征线法
- (2) 调整波速法

波速的计算本来并不十分精确，允许在一定幅度内自由修正波速值，且对水锤动态的影响不甚显著。规定允许支管长度 L_j 的波速相对修正系数 $\varphi_j \leq 10\%$ ，根据统一的计算时间步长 Δt ， L_j 支管的段数为

$$NN_j = \frac{L_j}{(1+\varphi_j)a_j\Delta t} \quad (\text{G.0.2-1})$$

式中， φ_j —j 管段波速修正系数

在允许的修正幅度之内，不同的支管可采用不同的 φ_j 值，保证每一个支管的 NN_j 凑成为整数。再进一步通过减小 Δt 和增加 NN_j ，可使 φ_j 控制在所规定的幅度之内。

- (3) 当量模型法

对于串联管道，按统一的计算时间步长 Δt ，由上游向下游依次划分步段，空间步长 $\Delta x_j = a_j \Delta t$ ，若其中一支管的末端剩余不足一个空间步长，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。

设跨管空间步长的实际总长度为 $\sum \Delta L_j$ ，水锤波的实际传播时间 $\Delta t = \sum \frac{\Delta L_j}{a_j}$ ，则，这种由跨管支管组成的空间步长的当量波速可取为 $a_e = \frac{\sum \Delta L_j}{\sum \frac{\Delta L_j}{a_j}}$

跨管空间步长由不同的几段支管组，跨管空间步长内的流体总动能为

$$\frac{1}{2} \sum \rho \Delta L_j A_j U_j^2 = \frac{1}{2} \rho Q^2 \sum \frac{\Delta L_j}{A_j} \quad (\text{G.0.2-2})$$

按照总动能守恒原则，可确定跨管空间步长的当量管截面积为

$$A_e = \frac{\sum \Delta L_j}{\sum \frac{\Delta L_j}{A_j}} \quad (\text{G.0.2-3})$$

根据水头损失与实际值一致的原则，跨管空间步长的当量常数为

$$R_e = \sum \frac{f_j \Delta L_j}{2gD_j A_j^2} \quad (\text{G.0.2-4})$$

(4) 短管方法

按统一的计算时间步长 Δt ，由上游向下游依次划分步段，空间步长 $\Delta x_j = a_j \Delta t$ ，若其中一支管的末端剩余不足一个空间步长，即称之为短管。由此可知，在处理短管之前，各标准管段内的波速就不要调整，以保证精度。

a. 调整短管波速

对于短管，调整波速的幅度就大很多。从原则上，只要整个系统按管长的加权平均改速的差值不超过 5%~10%，尽管短管本身的波速的调整幅度很大也是允许的。

b. 刚化短管

把短管中的水体和管壁看作为刚体，从而把导出相应的计算公式以代替特征方程。

c. 在控制方程中用差商代替微商法

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{H_1^{n+1} + H_2^{n+1} - H_1^n - H_2^n}{2\Delta t} \quad (\text{G.0.2-5})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_1^{n+1} + Q_2^{n+1} - Q_1^n - Q_2^n}{2\Delta t} \quad (\text{G.0.2-6})$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{H_1^{n+1} + H_2^{n+1} - H_1^n - H_2^n}{2\Delta x} \quad (\text{G.0.2-7})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_1^{n+1} + Q_2^{n+1} - Q_1^n - Q_2^n}{2\Delta x} \quad (\text{G.0.2-8})$$

由此可得到两个代数方程式，再联合有关的特征方程或边界条件即可解出短管的进口压力 H_1^{n+1} 和流量 Q_1^{n+1} ，以及其出口压力 H_2^{n+1} 和流量 Q_2^{n+1} 等四个未知量。

附录 H 计算网格划分与时间步长选择实例

H.0.1 上游水库管端阀控出流如图 H.0.1-1 所示，恒定水位 $H_0=150\text{m}$ ，管长 $L=5125\text{m}$ ，管内径 $D=0.5\text{m}$ 。阀门全开时流量系数 $C_0=0.009$ ，部分开度流量系数即 $C=C_0\tau$ ， $\tau=(1-t/t_c)^{1.5}$ ， τ 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 $a=1200\text{m/s}$ ，水力损失系数 $f=0.018$ 。

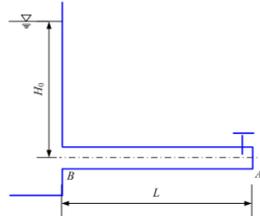


图 H.0.1-1 管道布置示意图

解：采用附录 A 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 B 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 $H_0=150\text{m}$ 。

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和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附录 F 中所述的调整波速法 $\Delta t = L_j / [a_j(1+\phi_j)]$ ，分析时间步长对计算结果的敏感性，采用计算时间步长 Δt 分别为 0.1 s、0.01 s、0.005 s 三种不同方案，如表 H.0.1-1 所示。

表 H.0.1-1 波速调整方案

方案	$\Delta t/\text{s}$	实际波速/(m/s)	调整后波速/(m/s)	$\Delta x/\text{m}$	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 H.0.1-2~图 H.0.1-4。由图 H.0.1-3 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 $\Delta t=0.01$ 即可满足要求，方案 b 为最优方案。

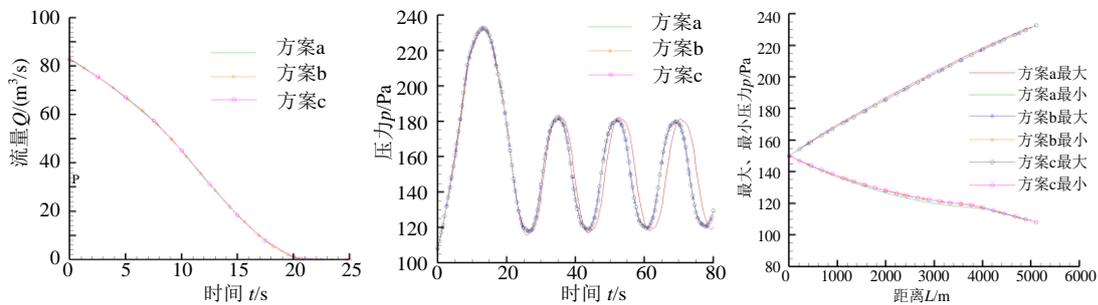


图 H.0.1-2 流量变化趋势 图 H.0.1-3 阀门前压力变化趋势 图 H.0.1-4 最大/最小压力包络图

附录 I 有压重力流输水系统计算工况

I.0.1 有压重力流输水系统的计算工况可按表 I.0.1-1 选择。

表 I.0.1-1 有压重力流输水系统计算工况选择

编号	输水系统布置 / 工况	备注
G1	高位水库+干线管道+末端阀门+低位水库 / 正常开阀	重点关注开阀过快时出现的低压情况
G2	高位水库+干线管道+末端阀门+低位水库 / 关阀	重点关注关阀过快时出现的高压情况，关阀规律需要整定
G3	高位水库+干线管道+首端阀门+低位水库 / 正常开阀	相当于空管充水，需要计算空气阀排气量及充水速度，需要控制阀门开度
G4	高位水库+干线管道+首端阀门+低位水库 / 关阀	需要关注关阀过快时液体汽化问题
G5	高位水库+干线管道+阀门+大气出流 / 开阀	相比于工况 G1、G3，需要注意管道出口边界条件为 $p=0$
G6	高位水库+干线管道+阀门+大气出流 / 关阀	相比于工况 G2、G4，需要注意管道出口边界条件为 $p=0$
G7	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、G5，需要注意起点与终点的压力边界条件
G8	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、G6，需要注意起点与终点的压力边界条件
G9	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上升情况
G10	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
G11	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上升情况
G12	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 J 泵送加压输水系统计算工况

J.0.1 泵送加压输水系统的水力过渡过程计算工况可按表 J.0.1-1、表 J.0.1-2、表 J.0.1-3 选择。

表 J.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	调压室最高、最低涌波水位，管道最大、最小水压
P2	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 拒动	机组最大反向转速
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	机组最大反向转速，水泵出水管最小压力
P4	出水池最低水位，进水池最高水位，最小扬程，n-1 台水泵运行，最后 1 台泵启动抽水，当流出上游调压井流量最大时，n 台机组同时事故断电，工作阀门全部拒动	调压室最高、最低涌波水位
P5	出水池最低水位，进水池最高水位，最小扬程，n-1 台水泵运行，最后 1 台泵启动抽水，在流出上游调压室流量最大时，n 台机组同时事故断电，工作阀门正常关闭	调压室最高、最低涌波水位
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	调压室最高、最低涌波水位
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	机组最大反向转速
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	出水管最小水压
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	出水管最小水压

表 J.0.1-2 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	最大反向转速工况	最小可能糙率系数
R2	最大水压工况	
R3	最小水压工况	
R4	最大反向转速工况	最大可能糙率系数
R5	最大水压工况	
R6	最小水压工况	

表 J.0.1-3 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，最后 1 台水泵启动，工作阀门正常开启	管道最大、最小水压
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	管道最大、最小水压； 最大反向转速
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	管道最大、最小水压； 最大反向转速
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	管道最大、最小水压； 最大反向转速

附录 K 常用的水锤防护措施

K.0.1 有压输水系统的常用水锤防护措施可按表 K.0.1-1 选择。

表 K.0.1-1 有压输水系统常用水锤防护措施

编号	名称	类型	功能	适用条件
M1	液控缓闭控制阀	缓闭蝶阀	通过整定缓闭控制阀的启闭规律来降低水锤压力波动	大型高扬程泵站。如果有 UPS 电源，也可采用电控缓闭控制阀代替
		缓闭球阀		
M2	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。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的目的	适用于小型泵站
M3	止回阀	缓闭式止回阀	通过缓闭止回阀的阀板（或不完全关闭阀板），将水压控制在允许值以下；降低机组反转数。	中、小型泵站及深井泵站
M4		液压式缓闭阀门	防止水锤升压过高，允许水经过水泵倒流，可作一阀三用（操作阀门，止回阀和消除水锤危害）。	对安全性要求高的泵站，需增设复杂液压系统，及其他后备措施
M5		快速关闭式	在流量接近 0 时快速完成关闭。防止了水倒流。	
M6	空气阀	进气阀	可防止液体汽化及弥合水锤危害；当输水管道的内部压力小于大气压时吸入一定的空气。	管道系统局部高点、每隔 500m~1000m 长水力系统
M7		排气阀	当管道内的压力大于大气压时，排出管道内的空气；空管充水时排气。可配合微量排气阀使用，减缓排气速度过快导致的压力波动。	管道系统局部高点、每隔 500m~800m 长水力系统
M8	调压塔	双向	管道出现低压（特别是液体汽化）时向管道注水，防止水柱分离及断流弥合水锤；出现高压时泄水减压。	用于大流量长管道系统，最好建于高地
M9		单向	管道出现低压（液体汽化）时向管道注水，防止水柱分离及断流弥合水锤。	用于大流量长管道系统。须增设由输水管向调压塔补充水的装置
M10	空气罐	有气垫	防止水泵工作阀门后升压过高 / 降压过低。	中、小型泵站
		无气垫		
M11	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。	用于中、小型卧式离心泵
M12	拍门	逆止阀	安装于排水管道的尾端，具有防止外水倒灌功能的逆止阀。	出水池水位高于出水管口、输水管道较短的中、小型泵站
M13	水锤爆破膜片		安装在水泵旁通管上，用于防止泵后出现超过规定极限的水锤压力。	高扬程泵站
M14	压力波动		安装在水泵旁通管上，当水泵突然停	中、小型泵站

编号	名称	类型	功能	适用条件
	预止阀		机时提前打开，当倒流的水流过来时泄放压力，当压力恢复时关闭。	
M15	水击泄放阀		安装在泵后管道上或管线压力最高点。	
M16	活塞式调流调压阀/锥形阀		安装在管道末端，也可根据需要安装在管道其他位置	重力流供水系统或大中型泵站输水系统

中国水利学会团体标准

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****—2022

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****-2022，于****年**月**日由中国水利学会以 2022 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法律效力，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构建	39
4.1	系统元件拓扑结构构建	39
4.3	边界条件和初始条件设置	39
5	水力过渡过程数值计算	40
5.3	数值计算	40
5.4	计算结果分析与处理方法	40
6	水锤防护措施	41
7	计算成果与报告编制	42
7.1	计算成果	42
7.2	计算报告编制	42

2 术语

2.0.1 有压输水系统 pressurized water transmission projects

有压输水系统包括输水管网、隧洞、加压泵、水池、阀门和水锤防护装置等。

2.0.3 水锤 water hammer

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 element

水力部件包括水库（水池）、管段、阀门、泵、空气阀等。

2.0.7 边界条件 boundary condition

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 稳态工况 steady condition

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 瞬变工况 transient condition

瞬变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 calculation of hydraulic transient process

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。

2.0.12 管网水力参数 hydraulic parameters of pipe network

水力学参数包括流量、压力、流速等。

2.0.15 水锤防护装置 protection device of water hammer

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塔、空气阀、水锤消除器等。

2.0.18 时程线 time line

又称历程线，动态参数包括流量、压力、机组转速、力矩等参数。

3 基本规定

3.1 基础数据的获取

3.1.1 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 管网及元件的物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、排气系数等。

6 水泵机组的主要参数包括型式、型号、转动惯量、全特性曲线、Suter 曲线、工作方式等。

11 其它必须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、指定位置的时间压力变化曲线、时间流量变化曲线与时间转速变化曲线等。

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 主要过程包括：启泵、停泵、关阀、开阀及流量调节瞬变过程。

4 水力过渡过程计算模型构建

4.1 系统元件拓扑结构构建

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、调压塔、水泵机组、调压塔、水锤消除器等元件。

4.3 边界条件和初始条件设置

4.3.1 主要参数包括沿程流量、压力、水位、各阀门的初始开度、水力机械的流量、转速、力矩等。

4.3.3 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、泵等，水锤防护元件包括空气阀、调流阀、调压塔、空气罐、压力波动预止阀、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。

4.7.1 关键元件的特性参数应在工程调试时进行实测。实测的元件一般应包含水泵、止回阀、减压阀、泄压阀、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软件。

5.4 计算结果分析与处理方法

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 机组的时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 其他曲线包括调压塔液面变化曲线、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

6.0.2 本条对计算结果不满足3.2.6条第5款规定的输水系统,提出了设置水锤防护装置的方法。工作阀门启闭规律包括线性关闭规律、拆线关闭规律以及三段关闭规律。

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应包括：未加水锤防护措施之前管网系统的最高压力包络线以及最低压力包络线，加水锤防护措施之后的整个水力系统的最高压力包络线以及最低压力包络线。

7.2 计算报告编制

7.2.1 计算结果与分析应包括未加水锤防护措施与加防护措施的计算结果对比分析。