

ICS 27.140

CCS P 58

DB 65

新疆维吾尔自治区地方标准

DB65/T 4718—2023

有压流输水管道水锤防护设计规程

**Code of practice for design of water hammer protection for pressurized flow
transmission pipelines**

2024 - 02 - 23 发布

2024 - 04 - 10 实施

新疆维吾尔自治区市场监督管理局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	3
5 基本规定	3
6 管道（网）水力分析和建模	4
6.1 一般规定	4
6.2 稳态分析	5
6.3 瞬态分析	6
7 安全防护	7
7.1 一般规定	7
7.2 安全防护配置	8
7.3 防护分析	11
7.4 防护评价	12
8 水力模型复核和水锤验证	12
附录 A（资料性） 水泵曲线（Q-H）定义示例图	13
附录 B（资料性） 瞬态分析方法与计算软件	15
附录 C（资料性） 管道安全防护常用设备	17
参考文献	21

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由新疆维吾尔自治区水利厅提出、归口并组织实施。

本文件起草单位：新疆水利水电规划设计管理局、新疆农业大学、西安普特流体控制有限公司、新疆水利厅农村饮水安全管理总站、新疆维吾尔自治区标准化研究院。

本文件主要起草人：李江、金波、张小莹、杨辉琴、杰恩斯·马坦、徐燕、周镇、边少康、张亚明、李旭东、郑玮、马平、马军、王旭。

本文件实施应用中的疑问，请咨询新疆水利水电规划设计管理局、新疆农业大学。

对本文件的修改意见建议，请反馈至新疆维吾尔自治区水利厅、新疆水利水电规划设计管理局（乌鲁木齐市黑龙江路146号）、新疆农业大学（乌鲁木齐市农大东路311号）、新疆维吾尔自治区标准化研究院（乌鲁木齐市河北东路188号）、新疆维吾尔自治区市场监督管理局（乌鲁木齐市新华南路167号）。

新疆维吾尔自治区水利厅 联系电话：0991-5816236；传真：0991-5816236；邮编：830000

新疆水利水电规划设计管理局 联系电话：0991-5585938；邮编：830000

新疆农业大学 联系电话：0991-8762805；传真：0991-8762994；邮编：830052

新疆维吾尔自治区标准化研究院 联系电话：0991-2817441；传真：0991-2817472；邮编：830011

新疆维吾尔自治区市场监督管理局 联系电话：0991-2818750；传真：0991-2311250；邮编：830004

有压流输水管道水锤防护设计规程

1 范围

本文件规定了有压流输水管道工程水锤防护设计总则、基本规定、管道（网）水力分析和建模、安全防护、水力模型复核和水锤验证的要求。

本文件适用于有压流输水管道工程，包括各类新建、改（扩）建和已建项目的管道建模、水力分析和安全防护方案设计。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

重力流输水 **water transmission by gravity**

利用地形高差，采用无外加动力满流承压管道输水的方式。

3.2

泵送输水 **water transmission by pumping**

利用水泵提供的动力能，采用满流承压管道输水的方式。

3.3

重力流泵送输水 **water transmission by pumping and gravity**

利用地形高差，同时采用水泵提供的动力能保障末端流量和压力要求的输水方式。

3.4

稳态分析 **steady state analysis**

使用管道（网）分析模拟软件，对建立的管道（网）水力分析模型在稳态流条件下，设定管道入口流量、压力或出口流量、压力参数，计算管网沿线节点、分水口和末端出口压力和流量，对设计供水工艺和能否满足供水要求进行的分析和验证。

3.5

水锤 **water hammer**

压力管道中由于流速快速改变，而引起压力在叠加效应下急剧交替升降波动、冲击和传播的现象，是管道由一个稳态向另一个稳态的过渡过程。

注：水锤又称水击或水力瞬态。

3.6

瞬态分析 **surge analysis**

使用管道（网）分析模拟软件，对建立的管道（网）水力分析模型设定断电停泵、启泵和不同的分水或末端关阀、开阀条件，计算管网系统水锤压力的最大、最小值和发生位置，以及管网沿线各节点在设定过渡过程时长条件下，管道全线水力和压力的波动包络数据，并对水锤的危害程度进行评价分析。

3.7

波速 wave speed

水锤波在管道内的传播速度。

3.8

转动惯量 moment of inertia

刚体绕轴转动时惯性的度量。

3.9

相长 phase duration

水锤波自水锤发生点至管道终点传播的往返时间。

3.10

管道水力计算表 piping hydraulic calculation table

设定入口液位或泵扬程、流量和管网分水口流量条件下，管道沿流程每单位距离的水头损失、测管水头、流速和压力的计算列表。

3.11

水力包络线图 hydraulic envelope line (HEL)

设定的断电停泵、启泵和不同的分水或末端关阀，所模拟出的水锤工况，沿管道高程在设定过渡过程时长条件下，管线各节点的最大、最小水头包络图。

3.12

压力包络线图 pressure envelope line (PEL)

设定的断电停泵、启泵和不同的分水或末端关阀，所模拟出的水锤工况，管道全线各节点在设定过渡过程时长条件下的最大、最小压力包络图。

3.13

压力变化线图 pressure change line

设定的断电停泵、启泵和不同的分水口或末端关阀，所模拟出的水锤工况，管网系统中各个节点在设定过渡过程时长条件下的压力变化曲线图。

3.14

安全防护 safety protection

输水管道在水锤工况下，可减缓水流速的变化速度，使水锤高压和低压处于管道和附属设备安全承压范围内，所采取的措施或使用的防护设备，并使用不同防护设备组合对水锤的抑制效果进行的评价分析。

3.15

止回阀 check valve

输水管道中为避免管道排空，防止管道水锤高压和水泵倒转损坏的专用阀门。

注：止回阀又称单向阀或逆止阀，主要分自动止回阀和控制关闭型止回阀两大类。

3.16

空气阀 air valve

输水管道中用于充水和运行中自动排出管道空气，在出现负压工况时自动进气防止管道真空的设备。

注：空气阀又称进排气阀，具有自动限制排气浮盘和抗气闭冲击功能的空气阀统称为防水锤型空气阀。

3.17

真空破坏阀 vacuum breaker valve

一般安装在虹吸式输水管道的驼峰上方(制高点)，在管道出现负压时候，开启阀门吸入空气破坏真空度，保护管道不会被吸瘪。

3.18

空气蓄能罐 surge tank

密闭的压力容器预充设定压力的空气，旁路安装在管道上，对管道水锤的低压和高压都具有抑制作用的设备。

注：空气蓄能罐又称水锤消除罐，根据结构和配置差异，可分为压缩空气罐、复合罐和内胆式水锤消除罐三类。

3.19

单向调压塔 feed tank or one-way tank

旁路安装在管道上，蓄水后利用地势高差和止回阀，在管道水锤的低压工况下，可向管道自动补水的设施或开口罐设备。

3.20

双向调压塔 open surge tank

旁路安装在管道上，具有既能利用液位补水防止水锤低压，又能泄放水锤高压的设施或开口罐设备。

3.21

安全泄压阀 pressure relief valve

旁路安装在管道上，可在管道压力超出设定压力值时，自动开启泄压，低于压力设定值可自动关闭，避免高压危害的设备。

注：安全泄压阀又称安全阀和泄压阀，主要分弹簧直动式和导阀从动式两类。

3.22

减压阀 pressure reducing valve

能够自动调节开度，使出口压力低于入口压力，并维持一个设定的出口压力值，同时在出口流量为零时，可自动关闭把管道隔离为两个压力区的设备。

注：根据功能分比例式减压阀、可调式减压阀和电控调节式等。

3.23

持压阀 pressure sustaining valve

能够在入口压力大于设定值时自动开启，小于设定值自动减小开度维持入口设定压力值，直至关闭的设备。

注：持压阀又称稳压阀或保压阀。

4 总体要求

4.1 对于有压流输水管道工程，应进行管道（网）水力分析和防护设计，即输水管道（网）的稳态分析和瞬态分析。

4.2 输水管道工程的水力分析建模和安全防护的设计应符合下列要求：

- a) 输水管道水力模型的稳态运行分析，可优化设计方案，复核输水工艺和设计参数安全合理；
- b) 模拟输水管道设定条件下的水锤工况，比选不同防护配置的可靠性，提出安全、经济和科学的防护方案；
- c) 制定安全的运行条件和预定管道系统安全防护设备的初始设置参数。

5 基本规定

5.1 新建输水管道工程，应提交管道水力建模分析和安全防护分析报告，建设过程中发生管材选择、防护设备选型等重大变更的工程，可按下列或变更审批部门要求开展管道水力分析和安全防护设计变更报告：

- a) 管道直径>500 mm, 长度>5000 m, 且水源和管道末端出水液位或管道最低点高差>50 m 的有压重力流输水管道工程;
- b) 管道直径>300 mm, 长度>10000 m, 且泵扬程>50 m 的泵送输水管道工程;
- c) 管道直径>500 mm, 长度>10000 m, 且泵扬程>30 m 的重力流泵送输水管道工程;
- d) 其他重要输水管道工程。

5.2 输水管道工程的管道(网)水力分析建模应以设计数据为基础, 包括管道水力计算表、泵站和管道设计图, 设计文件中的水源(水池)液位、水泵扬程、流量、机组转动惯量, 管道高程、距离(桩号)、管道直径、材质、管道附属设施、管道附件和管件配件应明确详实。

5.3 对于管道直径>1200 mm, 长度>20000 m, 且水源和管道末端出水液位或管道最低点高差>100 m 的有压重力流输水管道工程; 管道直径>1200 mm, 长度>10000 m, 且泵扬程>120 m 的泵送输水管道工程宜由 2 家或 2 家以上具备管道水力建模和水锤分析能力的单位进行水力模型瞬态分析和核验, 其他直径和长度管道工程可参考。

5.4 输水管道工程水力建模的稳态分析采用的水头损失计算公式应与设计所采用的计算方法保持一致。

5.5 对于已经建成的输水管道工程, 还应结合管道实际流量和压力监测数据, 对管道的高程、管道长度、直径、水泵扬程和局部水头损失等进行复测, 使用校核后的数据进行建模分析。

5.6 对于复杂工程宜采用 2 家或 2 家以上具备管道水力建模和水锤分析能力的单位进行分析研究。当采用 2 家或 2 家以上单位进行水力瞬态分析时, 所采用的软件应使用不同的计算分析方法, 其中一家采用特征线法时, 其他宜采用波特性法。

注: 在防护条件相同的情况下, 相互验证水锤分析和安全防护的一致性。

6 管道(网)水力分析和建模

6.1 一般规定

6.1.1 新建输水管道工程, 在管道建模和水力过渡分析过程中, 其采用的数据应与工程设计阶段的数据保持一致, 包括:

- a) 管道管径、长度、节点高程和材质;
- b) 水源水池(水库)液位和管道末端出口液位;
- c) 水泵曲线(Q-H)的定义应注明单点、三点或多点, 示例图见附录 A;
- d) 减压阀、持压阀、止回阀和检修阀应定义其开度和流量关系特征, 并与设计所采用的阀门型式一致;
- e) 新建管道摩阻系数的选取宜在相应管道材质的上下限之间做水力过渡过程的敏感性分析后进行选取, 摩阻系数无特殊要求宜按海曾-威廉系数取值;

注: 根据新疆小洼槽实际工程经验, 管道内摩阻系数越大其压力越大, 从管道工程的安全性考虑, 管道摩阻系数按上限选取。

- f) 改(扩)建和已建工程项目的管道摩阻系数宜通过水力模型分段校核确定;
- g) 管道附属设备和管件的位置和数量;
- h) 管道波速根据公式(1)计算确定:

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + [(K/E)(D/e)]c_1}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

a ——波速, 单位为米每秒(m/s);

K ——流体的体积弹性模量, 单位为牛顿每平方米(N/m²);

ρ ——流体的密度，单位为牛顿平方秒每四次方米 ($\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$)；

E ——管壁材料的弹性模量，单位为牛顿每平方米 (N/m^2)；

D ——管径，单位为米 (m)；

e ——管壁厚度，单位为米 (m)；

c_1 ——描述管子约束状态对波速影响的无量纲参数。

注： c_1 取值分为3种情况，其中 μ 为泊松比。管道只在上游末端固定时， $c_1=1-\mu/2$ ；管道全部固定，没有轴向运动时， $c_1=1-\mu^2$ ；管道全部采用膨胀接头连接时， $c_1=1$ 。

i) 水泵机组转动惯量由生产厂家试验提供，或由公式(2)～公式(4)计算确定：

$$I = 0.3964 \times \left[\frac{P}{(N/1000)^3} \right]^{0.9556} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

I ——水泵的转动惯量，单位为牛顿平方米 ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)；

P ——电机功率，单位为千瓦 (kW)；

N ——水泵转速，单位为转每分钟 (r/min)。

$$I = 0.33423 \times \left[\frac{P}{(N/1000)^3} \right]^{0.884} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

I ——小、轻水泵的转动惯量，单位为牛顿平方米 ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)；

P ——电机功率，单位为千瓦 (kW)；

N ——水泵转速，单位为转每分钟 (r/min)。

$$I = 0.0422 \times \left[\frac{P}{(N/1000)^3} \right]^{1.48} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

I ——电机惯量，单位为牛顿平方米 ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)；

P ——电机功率，单位为千瓦 (kW)；

N ——水泵转速，单位为转每分钟 (r/min)。

6.1.2 建模水力分析应包括管道系统的稳态分析、瞬态危害工况分析和安全防护分析。

6.1.3 进行水力模型计算分析复核时，所选定的以下水锤分析和安全防护条件应一致：

- a) 水泵停泵、启泵和开阀、关阀时间；
- b) 安全防护所配置的各类安全防护设备的规格、形式、安装位置和设定参数；
- c) 控制关闭型止回阀的关闭开度和时间特征参数。

注：若出现其他不一致情况时，如发明新型水锤安全防护设备或水锤安全防护设备选型不同等问题，双方协商一致与设计单位共同沟通，确定其参数。

6.2 稳态分析

6.2.1 通过管道(网)分析模拟软件对项目管道建立管道水力模型后，基于设计额定输水工况，应提交以下稳态分析结果，图表应采用通俗易懂的表达形式，避免产生歧义：

- a) 管道水力坡度线图；
- b) 管道动压线图；
- c) 管道水力计算表；
- d) 管网压力分布图(针对节水灌溉输水管网)。

6.2.2 设计输水工况下，管道水力坡度线和水力计算表用于复核管道沿线各节点的最小压力是否满足

满管流承压输水要求。

6.2.3 分析复核后的管道，沿线各节点的最小压力应 ≥ 0.02 MPa。当输水管道工程采用1条或多条管道输水时，应对过流能力为设计流量的70%的运行工况进行瞬态分析。

6.2.4 管道动压线可用于评估管道运行压力是否在管道承压能力范围之内。

6.2.5 有压重力流输水项目有日、夜或季节流量变化，并且管道设置有减压调流阀门时，应依据项目最小输水流量，分析和计算减压调流阀门的减压比和气蚀系数，符合设计所选定的减压调流阀型式和口径能否满足最小流量运行要求。

6.2.6 对于节水灌溉项目，通过管网压力分布图，应能复核灌区内各轮灌组的供水压力能否满足灌水器最低压力要求，灌水器的最低压力要求可由设计资料查验。

6.3 瞬态分析

6.3.1 瞬态分析方法与计算软件见附录B。

6.3.2 有压重力流输水项目的瞬态分析，宜按以下模拟条件确定：

- a) 管道在最大输水流量工况下，模拟末端出口控制阀开度全开至完全关闭的时间，宜从短到长设定多个关阀时间，并由分析结果给出建议关阀时间，该时间作为检修阀电动减速机构的限制条件，或人工关闭需遵守的关阀制度；
- b) 控制阀全开至完全关闭的最短关闭时间，依照可选择的电动执行机构，可按以下规则确定：
 - 1) 管道直径50 mm~200 mm，最小关闭时间3 s~60 s；
 - 2) 管道直径200 mm~500 mm，最小关闭时间10 s~90 s；
 - 3) 管道直径500 mm~1000 mm，最小关闭时间25 s~100 s；
 - 4) 管道直径1000 mm~2000 mm，最小关闭时间30 s~200 s；
 - 5) 管道直径>2000 mm以上，最小关闭时间60 s~300 s。
- c) 当所选择的最小关阀时间对水锤影响较大时，可延长阀门关闭时间，并作为电动执行机构的减速比或启闭速度的限制条件；
- d) 当有压重力流输水管道有多个分水口时，宜分别对最大的1个~2个分水口控制阀前检修阀同时关闭，系统各个分水口控制阀前检修阀依次关闭，进行管道可能的最大危害水锤工况分析。

注：对于重力流关阀时间可按照现有标准化电动执行机构的常规减速比和阀门从完全开启至完全关闭的时间所确定。

6.3.3 泵送输水项目的瞬态分析，宜按以下模拟条件确定：

- a) 水泵机组在设计额定扬程和流量工况下，以断电停泵和止回阀关闭作为模拟条件；
- b) 止回阀的选型由公式(5)确定：

$$t_s = \frac{(v_1 - v_2)L}{g \times \Delta H} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

t_s ——断电停泵后管道中水由设计流速至静止的时间，单位为秒(s)；

L ——止回阀后至末端的管道长度，单位为米(m)；

v_1 ——管道设计流速或止回阀全开最小流速，单位为米每秒(m/s)；

v_2 ——静止流速，单位为米每秒(m/s)，一般为0；

g ——重力加速度，单位为米每平方秒(m/s²)，取9.81；

ΔH ——水锤压力上升值，单位为米(m)。

- 1) 当计算的管道中水由设计流速至静止的时间(t_s)<30 s，宜采用自动型止回阀；当静止时间>30 s，宜采用控制关闭型止回阀；

- 2) 控制关闭型止回阀的两阶段关闭时间由计算相长确定, 第一阶段的关闭时间宜小于等于相长, 阀门关闭开度控制在 60%~90%, 第二阶段的关闭时间宜大于相长, 阀门关闭开度控制在 10%~40%, 相长计算由公式 (6) 确定:

$$t = 2L/a \cdots \cdots (6)$$

式中:

t ——相长, 单位为秒 (s);

L ——管道长度, 单位为米 (m);

a ——波速, 单位为米每秒 (m/s)。

6.3.4 重力流泵送输水项目, 泵后不宜设止回阀, 但为避免断电停泵后管道排空, 分水口或管道末端应设置持压阀, 水锤宜按以下模拟条件确定:

- 以断电停泵、分水口或末端持压阀关闭作为模拟条件;
- 当分水口或末端出口持压阀入口的压力, 小于最大设计流量条件下的压力时, 阀门自动减小开度直至关闭, 其关闭时间取决于持压阀的水力模型设定。

6.3.5 泵送输水管道, 当沿线有较大的驼峰起伏, 且后段为有压重力流输水时, 应参照 6.3.4 的规定确定水锤模拟条件。

6.3.6 瞬态分析应提交以下无安全防护的水锤危害分析结果, 图表应采用通俗易懂的表达形式, 避免产生歧义:

- 水力包络线图;
- 压力包络线图;
- 管道最大压力发生点的压力波动线图;
- 管道最小压力发生点的压力波动线图;
- 泵转速变化线图。

6.3.7 通过水力包络线图和压力包络线图, 应能直观查看管道沿线的水锤高压和低压分布, 评估水锤的危害程度。

6.3.8 通过管道最大和最小压力波动线图, 应能直观查看设定过渡过程时长条件下, 管道的最大和最小压力发生点的压力值及该节点的压力波动频率和幅度特征。

6.3.9 对止回阀选型或确定关阀特征时间后, 泵转速变化线的分析结果: 水泵的最大反转转速对于离心泵宜控制在额定转速 0.5 倍以内, 反转时长不宜大于 1 min; 对于轴流泵或导叶式混流泵不宜超过泵额定转速 1.2 倍, 反转时长不宜大于 2 min。

7 安全防护

7.1 一般规定

7.1.1 管道系统配置安全防护设备或采取防护措施后, 瞬态分析除提交 6.3.6 中规定的分析结果外, 还宜提交以下分析结果:

- 安全阀泄水量变化线图;
- 蓄能罐气液体积变化线图;
- 空气阀进排气量变化线图。

7.1.2 输水管道增设安全防护后的水锤分析, 根据水力包络线图、压力包络线图、管道最大和最小压力发生点的压力变化线图的分析结果, 满足以下条件:

- 泵送输水管道, 不宜超过水泵额定扬程的 1.4 倍~1.5 倍;

- b) 重力流输水管道,不宜超过管道最低点最大静压的 1.5 倍~2.0 倍,当管线设有 2 段以上开放源减压消能设施时,应分段分析计算。

7.1.3 输水管道安全防护后的水力模型分析结果,全线水锤最小压力宜满足以下条件,本文件结合管道防护运行实际仅规定了常规条件下管道的最小压力,设计人员应根据选用的管道壁厚和材质进行负压屈服应力计算,当满足本条规定时,无需调整。不满足时,应增大管道壁厚或提高最小压力条件。

- a) 管道直径为 300 mm~500 mm 的输水管道,不超过 1 s 的瞬时最小压力不宜低于-9.5 m,且为一个单独的低压节点,多次波动不超过 1 s 的瞬时最小压力不宜低于-7.5 m,持续时长 3 s 以上的负压不宜低于-5.5 m,且连续的负压管段长度 ≤ 2000 m。
- b) 管道直径为 600 mm~1000 mm 的输水管道,不超过 1 s 的瞬时最小压力不宜低于-7.5 m,且为一个单独的低压节点,多次波动不超过 1 s 的瞬时最小压力不宜低于-5.5 m,持续时长 3 s 以上的负压不宜低于-5 m,且连续的负压管段长度 ≤ 1000 m。
- c) 管道直径为 1000 mm 以上的输水管道,不超过 1 s 的瞬时最小压力不宜低于-5.5 m,且为一个单独的低压节点,多次波动不超过 1 s 的瞬时最小压力不宜低于-5 m,持续时长 3 s 以上的负压不宜低于-3 m,且连续的负压管段长度 ≤ 500 m。
- d) 高海拔地区,应考虑真空气化影响,建议专门分析计算。

7.1.4 管道安全防护设备应选用标准、通用的产品,满足设备选型、采购、维护、兼容和升级换代的要求,宜使用智能化、模块化和多重防护能力的设备。

7.1.5 管道安全防护设备常用种类如调压塔类、空气阀类、止回阀类、调压阀类、空气罐类、安全泄压阀类等,但不限于以上设备,具体设备安装条件及防护原理详见附录 C,附录中防护设备适用于输水或不可压缩介质。

7.2 安全防护配置

7.2.1 空气阀是输水管道的基本配置,应按以下原则设置:

- a) 输水管道的长上升段每隔 800 m,长下降段每隔 500 m,平直段每隔 500 m~1000 m 设置 1 台空气阀;
- b) 管线中的局部高点、平直管段与向下管段的变弯点,管道变径大口侧和检修阀前后;
- c) 水泵止回阀后、高压至低压过渡段(点)和管道的封闭盲端;

注:封闭盲端指管道中闭合的一端,有堵板或阀门封闭,液体介质可以到达,但是不流通。

- d) 水泵止回阀后、管道局部高点和封闭的管道盲端宜设置防水锤型空气阀;
- e) 直径 >2000 mm 以上的输水管道,局部高点、长下降管段、长上升管段和变弯点,宜设置大口径真空破坏阀;
- f) 在条件允许的情况下,同节点的空气阀应并联设置,并联空气阀进出口截面积合计应与设计的截面积一致。

7.2.2 空气阀的口径依照应用经验,初步可按输水管道直径的 $1/12\sim 1/6$ 选取,通过瞬态分析结果进一步调整。空气阀的口径除按经验选取外还可按公式(7)计算。

$$d_0 = 1.05D\left(\frac{v}{v_0}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- d_0 ——空气阀低压进排气孔口径,单位为毫米(mm);
 D ——被保护管道的内径,单位为毫米(mm);
 v ——被保护管道内水流速度,单位为米每秒(m/s);
 v_0 ——空气阀排出空气的流速,单位为米每秒(m/s)。

7.2.3 防水锤型空气阀的低压排气缓闭孔的孔径,可按低压进排气通径的 $1/16\sim 1/30$ 初步选取,并根

据瞬态水力分析的模拟结果确定最佳设定值。为防止负压进气后快速排气引起管道中的弥合水锤，通过瞬态计算分析后可采用“快进慢排”的防水锤型空气阀布置。

7.2.4 安全泄压阀用于防止管道高压危害，在瞬态危害分析后，应配置于管道最大压力发生节点，对于泵送输水管道，阀门的高压设定值应高于水泵额定工作扬程 0.1 MPa~0.2 MPa，对于重力流输水管道，阀门的高压设定值应高于管道静压 0.1 MPa~0.2 MPa。

7.2.5 水锤消除阀主要用于泵送输水管道，配置和高压设定值与安全泄压阀相同，低压值初始可设定低于管道静压 0.1 MPa，并应由该节点瞬态分析的压力变化，通过压降幅度选取最佳低压设定值。

7.2.6 水锤消除阀在静扬程较大的泵送输水管道中，会引起末端较严重负压，需根据瞬态分析结果谨慎选用，并避免与空气蓄能罐同时使用。

注：在高静扬程的输水管道中，由于水锤消除阀低压开启泄水的特征，会导致管道末端出现严重的负压，同时，设置在泵站与空气蓄能罐联合防护水锤时，会导致空气蓄能罐补水作用减弱或丧失。

7.2.7 安全泄压阀和水锤消除阀的口径，可按设置点管道直径的 1/6~1/4 初设，通过瞬态分析的压力变化线图，选择最佳适配口径。

7.2.8 安全泄压阀和水锤消除阀的延迟关闭速度，初步分析时，可按 5 s~15 s 确定，通过压力变化线图的分析结果，以压力波动频率和幅度最小的结果为最佳设定值。

7.2.9 空气蓄能罐在用于补水防止管道负压时，预充压宜按 0.02 MPa~0.1 MPa 初步确定；在用于防止管道升压时，宜按该处运行压力的 0.5 倍~1.2 倍初步确定。通过瞬态分析的压力变化线图结果，空气蓄能罐设置点的最小压力应 ≥ 0 MPa。

7.2.10 空气蓄能罐在管道中单个布设时，罐体容量可按公式（8）或公式（9）计算初步选取：

$$V_1 = \frac{3.43 \times 10^{-4} ALv^2}{P_1[(P_2/P_1)^{(n-1)/n} - 1]} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

V_1 ——空气蓄能罐的容积，单位为立方米（ m^3 ）；

A ——管道截面积，单位为平方米（ m^2 ）；

L ——管道长度，单位为米（m）；

v ——平均流速，单位为米每秒（m/s）；

P_1 ——工作压力，单位为兆帕（MPa）；

P_2 ——允许最大压力，单位为兆帕（MPa）；

n ——气体膨胀系数，取值 1.4。

$$V_2 = \frac{[2.8Q_sL/A](n-1)}{(P_2/P_1)^{(n-1)/n} - 1} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

V_2 ——空气蓄能罐的容积，单位为立方米（ m^3 ）；

Q_s ——管道流量，单位为立方米每秒（ m^3/s ）；

L ——管道长度，单位为米（m）；

A ——管道截面积，单位为平方米（ m^2 ）；

n ——气体膨胀系数，取值 1.4；

P_1 ——工作压力，单位为兆帕（MPa）；

P_2 ——允许最大压力，单位为兆帕（MPa）。

7.2.11 空气蓄能罐的预充压、罐体容量和进出口直径在初步计算或选取后，应由水力模型模拟调整，选择最佳参数确定。

7.2.12 管道中单向调压塔单个布设时，容量可按公式（10）~公式（11）初步选取，计算容积应乘以 1.5 倍~2 倍的安全系数：

a) 设在水泵的出口处：

空气蓄能罐等防护设备，并满足管道最小压力的要求。

7.3.3 安全泄压阀或水锤消除阀的瞬态分析模拟结果，最大压力应能满足 7.3.1 的规定，查验安全阀的压力和泄水量变化线，波动频率较高时，应调整延长阀门关闭设定时间。

7.3.4 空气蓄能罐的瞬态分析，防护模拟结果由气液体积变化线验证，液体体积不应为零。

7.3.5 双向调压塔和单向调压塔的瞬态分析，防护模拟结果由压力变化线验证，压力不应为负压。

7.4 防护评价

7.4.1 输水管道的安全防护，应利用不同的安全防护设备和措施，至少提供 2 个以上不同的防护组合，用于方案比选。

7.4.2 输水管道直径 >2000 mm 的长距离、大落差或高扬程输水管道，安全防护应具备一定的冗余，防止个别安全防护设备失效导致重大管道事故。

7.4.3 输水管道的安全防护方案应以易于实施，防护可靠、便于维护和运行费用低为原则确定推荐方案。

8 水力模型复核和水锤验证

8.1 新建输水管道项目，在建成通水前、后，应对管道设计数据测量修正，稳态分析计算结果宜与实际运行数据一致。由于管道实际施工过程中存在因征占地修改管道平面布置、因地质条件变化修改管道纵向布置等，对于新建输水管道项目，在建成通水前，应对管道设计数据进行测量修正，复核稳态分析计算结果，当出现较大偏差时应及时调整运行工况或设备布局，避免出现问题。

8.2 修正后的管道水力模型，应复核瞬态分析结果，提出安全防护设备的设定参数修正。

8.3 方案设计中宜加入水锤和安全防护设备的监测，并在条件允许的情况下，按照水力模型瞬态分析的设定条件，进行断电停泵或末端关阀实验，采集在水锤条件下的压力、流量、气液状态、液位和开度等数据，验证管道系统安全防护的有效性。基于当前监测技术发展及数字孪生技术应用要求，管道输水工程方案设计中宜加入水锤和安全防护设备的监测，目的是通过监测手段验证管道系统安全防护设备的有效性，为工程在线调控提供依据。重要且有条件的工程宜将水锤在线监测、渗漏监测、管道结构监测等一并纳入数据采集与监视控制（SCADA）系统中，并构建水力在线模型，为管道智能安全防护和运行调控提供技术支撑。

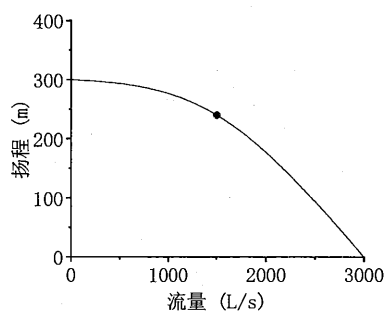
附录 A

(资料性)

水泵曲线 (Q-H) 定义示例图

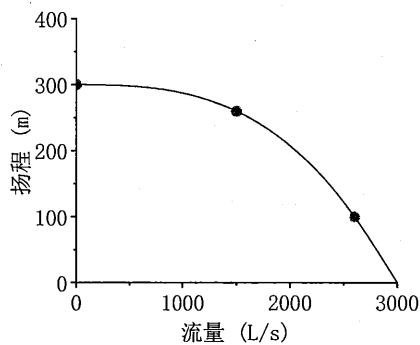
A.1 水泵曲线 (Q-H) 的定义应注明单点、三点或多点。

- a) 单点式曲线。单点式水泵曲线通过单个代表了水泵期望工况点的扬程—流量组合来定义，如图 A.1 所示。



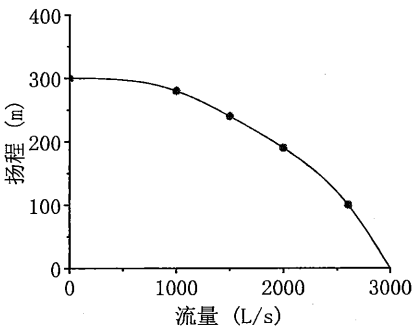
图A.1 单点式水泵曲线

- b) 三点式曲线。三点式水泵曲线通过三个工况点来定义：低流量点（在低流量或者零流量条件下的流量和扬程），设计流量点（期望工况点的流量和扬程），以及最大流量点（最大流量时的流量和扬程），如图 A.2 所示。



图A.2 三点式水泵曲线

- c) 多点式曲线。通过四个以上的扬程—流量点来定义多点式水泵曲线，如图 A.3 所示。



图A.3 多点式水泵曲线

附录 B

(资料性)

瞬态分析方法与计算软件

B.1 瞬态分析计算方法

B.1.1 特征线法

B.1.1.1 特征线法水锤计算是对整个输水管道系统进行分析计算,在瞬态分析计算中,对于管道系统内点的计算是求解水锤基本方程,即由运动方程见公式(B.1)和连续方程见公式(B.2)组成的双曲型偏微分方程组。

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2d} V|V| = 0 \quad (\text{B.1})$$

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

式中:

- V ——控制体的流速,单位为米每秒(m/s);
- t ——时间变量,单位为秒(s);
- H ——控制体的测压管水头,单位为米(m);
- x ——沿管中心线的距离,单位为米(m);
- g ——重力加速度,单位为米每平方秒(m/s^2);
- f ——管道摩阻系数;
- d ——管道直径,单位为米(m);
- a ——水锤波速,单位为米每秒(m/s);
- α ——管道坡度角,单位为度($^\circ$)。

B.1.1.2 可利用特征线法把偏微分方程变换成常微分方程,近似成差分方程再进行计算。特征线算法具有稳定性高、边界条件易输入、精度高等特点,可对各种管内进行瞬态分析,包括气液两相流的瞬态分析进行计算。

B.1.2 波特特性法

波特特性法是以管道系统水力扰动所产生的压力波动为理论基础,通过追踪水锤波的发生、传播、反射和干涉,来计算各节点不同时段瞬态压力值,对管道安全防护设备节点的分析结果比特征线法更加全面。波特特性法具有特征线法不具备的高效的计算速度,主要体现在大型管网进行水力计算时的速度优势非常显著。波特特性法是一种不考虑时空网格的求解方法,它是一种拉格朗日形式的求解方法,与传统的特征线法对偏微分方程组的求解存在明显不同。波特特性法对压力波的追踪过程可以以固定时间步长进行,也可以以真实状态变化的时刻(可变时间步长)进行。这种处理方式减少了对管道内部节点的计算,因此具有明显的计算效率优势,更加适合于大规模管网的瞬态分析。另外,波特特性法中,管道摩阻系数的影响作用是通过修改压力波在管道中传播时的幅度变化来近似估计。这种方式可较为准确地模拟管道稳态摩阻的作用,但无法考虑瞬态摩阻、粘弹性效应、压力波衰减等复杂的瞬态分析过程。

B.2 瞬态分析计算软件

B.2.1 KYPipe

KYPipe软件具备处理稳态流体、水锤、气体、蒸汽、暴雨水等多种流体水力设计与分析的能力，软件中Surge模块使用波特性法计算水锤，使用该模型，可在屏幕上绘制管道布局示意图，并在其上放置导入的背景图像，如街道或高程等高线地图。边界装置包括水泵、阀门、水库、调压室、空气罐、空气阀和真空阀门、超压泄压阀、涌浪预测阀和热交换器。对于每个管道路径，最大、最小瞬态压力等级线可以绘制在标高与距离的关系图上。

B.2.2 HAMMER

HAMMER软件基于特征线法进行水锤瞬态分析，可以从EPANET和WATERCAD中导入稳态数据作为初始条件，边界条件的设备包括泵、空气罐、开敞式调压室、水库、调压控制阀、真空破坏阀、空气阀和带有止回阀的旁路管线。可用于模拟水泵掉电、关阀、爆管和水泵启动。对于管道和管网，可以提供节点和管道沿线的瞬态压力、流量和空气或蒸汽体积的时间历程动画和图表。

B.2.3 PIPENET

PIPENET软件使用特征线法进行水力瞬态分析及水锤压力计算，边界装置包括泵、气垫调压室、水库、调压室、沉箱、真空破坏阀、止回阀、流量控制阀、超压泄压阀和空气阀。计算节点、管道和边界设备的压力和流量，以及管道和弯头上的瞬态压力。输出数据可以绘制为时间历程曲线，每个图都有可自定义的标题。例如，节点、管段或边界设备上的压力和流量时间历程曲线。可以绘制气垫调压室液面随模拟时间的曲线图。

B.2.4 AFT Impulse

AFT Impulse软件使用特征线法进行水力瞬态分析，可计算管网中由水锤引起的瞬态压力。AFT Impulse可对不可压缩流体和可压缩流体进行瞬态分析，包括水、汽油和其它精炼油品、化工产品、冷冻剂、制冷剂、不可压缩流体和包括高压蒸汽、压缩空气等可压缩流体的管网系统。其广泛应用于化工、电力、石化、造船、航空、制药等行业的各类系统中。

B.2.5 InfoWorks软件

InfoWorks软件中的TS模块专门用于压力管网中的水锤效应的水力计算，该模块可以用于对管网模型中选定节点在瞬变情况下的压力和流量进行分析。InfoWorks TS数值求解方法为拉格朗日时间驱动波特性法，具备高效的计算能力，能够针对管网提供精准的方程解，InfoWorks TS模块可以模拟和评估水力瞬态分析，还可以模拟实施、分析和比较不同的水锤保护设备的效果。

B.2.6 其他或自编软件

各有关其他计算单位使用C++、VB、Fortran等语言自编水锤计算分析软件或其他商用软件。可提供3个以上用户证明使用业绩的自编软件也可以作为计算分析软件。

附 录 C
(资料性)
管道安全防护常用设备

表C.1给出了管道安全防护设备常用种类及具体设备安装条件及防护原理。

表C.1 管道安全防护常用设备一览表

防护设备		功能
调压塔类	单向调压塔	单向调压塔是旁路安装在管道上，蓄水后利用地势高差和止回阀，在管道水锤的低压工况下，可向管道自动补水的设施或开放罐设备，防止产生负压和消减断流弥合水锤过高高压的水锤防护设备。可设置于输水干线上容易产生负压和水柱分离的主要特异点，如主要峰点、膝部折点、驼峰以及鱼背点等
	双向调压塔	双向调压塔是旁路安装在管道上，具有既能利用液位补水防止水锤低压，又能泄放水锤高压的设施或开口罐设备。一种兼具注水与泄水缓冲式的水锤防护设备，其典型特征是塔（井）与管道为贯通连接。当输水管道中压力降低时，调压塔可迅速向管道补水，防止管道产生负压。当管道中水锤压力升高时，它允许高压水流进入调压塔中，起到缓冲水锤升压的作用。当发生突然事故停泵时，它能向管路中补充水，有效防止了水柱分离及断流再弥合水锤升压 双向调压塔装设于输水干管上易于发生水柱分离的高点或折点处。在泵站附近或管道的适当位置修建，双向调压塔的水面高度应高于输水管道终点接收水池的水面高度
	箱式调压塔	箱式双向调压塔是在普通双向调压塔的基础上进行改良，利用活塞面积压力来代替传统水压线压力，采用上下不等面积活塞增压原理设计的新型调压塔，具有泄压和补水功能。调压原理是：采用上下不等面积活塞增压原理，使活塞上部面积乘其水深等于活塞下部面积乘以管道设计最大压力之积，达到活塞的动态平衡。其具有防水锤泄压溢流性能高、泄压动作回位误差小、动作灵敏，反应迅速，对任何水锤都有良好的防护效果、防止产生断流弥合水锤等优点
空气阀类	高压微量排气阀	输水管道中用于充水和运行中自动排出管道空气，高压微量排气阀用来排出系统正常运行过程中管道中聚集的气体，排气量小。管道中一旦有气体析出，微量排气阀便自动动作，随时排放在管道内聚集的少量空气，防止管道发生气阻、气爆等不利工况，是系统流量达到设计流量，保证系统安全、高效运行
	防水锤空气阀	防水锤型空气阀也称三级缓闭型防水锤空气阀，其构造增加了一个限流排气组件，空气在管道内的排气为限流盘、低压进排气浮球和高压微量排气浮球为三级缓闭排气过程 防水锤空气阀运行过程如下： - 在管道充水及水柱回流时，快速、大量排气； - 当排气压差达到预先设定值时，限流盘上升，关闭主排气口，只允许空气从限流盘中间的小孔排出，限制水柱弥合速度； - 当空气排空后，水流上升，先将低压进排气浮球顶起，关闭低压排气口，限流盘下落至开启位置，随后关闭高压微量排气口

表C.1 管道安全防护常用设备一览表（续）

防护设备		功能
空气阀类	浮块复合式空气阀	浮块复合式空气阀主要由阀盖、排气口座、限流盘、微量排气浮块、低压浮阀轴和阀体等组成。管道在充水工况时，空气由阀内环形空腔从排气口排出，具有防水锤功能要求时，如果是水柱弥合工况或排气气流速度高于设定值时，限流盘关闭，只允许限流孔排气。当水流进入阀体内时，浮球总成受水浮力作用关闭低压密封口，当水中持续产生空气时，低压浮块下降，空气由高压微量排气孔排出，空气排出后，低压浮块上升，保持微量排气孔密闭。当管道内发生真空时，浮球总成下落，空气阀进气，防止管道产生负压
	气缸式空气阀	气缸式空气阀主要由壳体、浮筒、排气盖板、大小两排气口、气压缸、活塞杆、导管等组成。其工作原理如下：当阀体内存气时，浮筒下降，带动小盖板动作上升堵住阀帽上的通气孔，同时打开小阀座，使阀体内有压气体进入气缸，因气缸内气动膜片面积远大于大排气口盖板面积，故大排气口开启排气，管道存气即可高速排出；当气体排尽后，浮筒上升，控制膜片的导管与大气连通，盖板受阀内压力作用复位，封住排气口。当管道出现负压时，进气口盖板打开进气，以防止产生蒸汽型断流空腔
	动力型防水锤空气阀	动力型防水锤空气阀也称隔膜式防水锤空气阀，主要由高压微量排气阀、阀盖、隔膜、阀盘和阀体等组成。动力型防水锤空气阀的低压进排气阀的开启和关闭是利用了液压力学的原理。动力型防水锤空气阀由于具有缓闭泄压功能，在水锤防护控制性能方面较三级缓闭型防水锤空气阀更好，可以很好地控制水柱弥合工况下引起的压力波动，但受隔膜材质和承压限制，其承压等级最高为1.6 MPa，在压力更高的承压管道中应用受限
止回阀	自动型止回阀	轴流式止回阀
		旋启式止回阀
		重锤式止回阀
		水泵控制阀

表C.1 管道安全防护常用设备一览表（续）

防护设备			功能
止回阀	控制关闭型止回阀	液控缓闭止回阀	液控缓闭止回阀适用于泵出口管路上，作为闭路止回阀，用来避免和减少管路系统中介质倒流，延缓关闭的方式使局部倒流水向系统内泄流，从而大大降低了停泵倒流的水压冲击力，消除了破坏性水锤峰值的产生，以保护管路系统。该阀主要由阀体、阀瓣、缓冲装置和微量调节阀组成。该产品具有结构新颖、体积小、流体阻力小、运行平稳、密封可靠、抗磨损、缓冲性能好等特点
		两阶段止回阀	两阶段止回阀为橡胶密封蝶形止回阀，在管路系统中具有截流止回功能，阀门关闭可实现两阶段关闭，通过节流阀调节关闭速度，分级式阻尼油缸可实现缓闭功能，并可有效消除水锤，保证系统安全。采用蝶形止回阀结构，体积小、重量轻，占地空间小，便于现场安装布置。两阶段止回阀主要由缓闭油缸部件、蝶阀和重锤部件三部分组成
空气罐类 (复合罐)	压缩空气罐		压缩空气罐是一种内部充有一定量压缩空气的金属水罐装置，主要由罐体、控制盘、玻璃液位计、安全阀、压力计和空气压缩机等组成。一般直接安装在水泵出口附近的管道上。其消除停泵水锤升降压的原理是：当发生水锤，管道内压力升高时，罐内的压缩空气被再度压缩，起到气垫消能作用；当管内压力陡降时，或发生水柱分离时，又可利用压缩空气膨胀向管中注水，因而可有效消减停泵水锤危害
	内胆式水锤消除罐		内胆式水锤消除罐主要由罐体、丁基橡胶内胆、电接点压力表、液位显示和报警装置、排水阀、充排气阀和控制器等组成。内胆式水锤消除罐中水与空气无接触，避免了空气在水中的溶解，使得罐内或内胆内的压力稳定。在防护过程中无呼吸需求和泄水，可安装在半地下构筑中，防冻性能优良，非常适合北方寒冷地区
	复合罐	带有空气压缩的混合罐	这种罐的性能和压缩罐一样，直到气压下降到大气压力为止。在那个时候，空气通过顶部的排气口进入。在正常工作条件下，压缩机需要保持理想的气体体积
		带有水封管的混合罐	这种罐的功能与配备空气压缩机而不需要压缩机的功能相同。当向罐中冲水时，水封管控制排气口的关闭，在正常的操作条件下，水封管的长度是不同的，以保持理想的气体体积
安全泄压阀类	先导式泄压阀		旁路安装在管道上，可在管道压力超出设定压力值时，自动开启泄压，低于压力设定值可自动关闭，避免高压危害的设备。先导式泄压阀由主阀和导阀两部分组成，主阀的隔膜腔截面积大于阀座口的截面积。在承压条件下，流体介质由三通导阀进入隔膜腔内，隔膜作用于阀座的压紧力大于介质的开启力，阀门保持关闭 当系统内压力大于导阀设定值时，系统压力克服导阀张紧力，导阀滑阀向上移动，把主阀隔膜腔内水压导通主阀排水口或大气，主阀开启泄压 当系统内压力低于导阀设定值时，导阀复位，流体介质再次由三通导阀进入隔膜腔，主阀关闭

表C.1 管道安全防护常用设备一览表（续）

防护设备	功能
水锤消除器	水锤消除器的内部有一密闭的容气腔，下端为一活塞，当冲击波传入水锤消除器时，水击波作用于活塞上，活塞将往容气腔方向运动。活塞运动的行程与容气腔内的气体压力、水击波大小有关，活塞在一定压力的气体和不规则水击双重作用下，做上下运动，形成一个动态的平衡，这样就有效地消除了不规则的水击波震荡 水锤消除器一般安装在靠近产生水锤的元件之前，以便在超压的时候有效减震。可以水平、垂直甚至倒置安装，但是不可以安装在系统滞水区域
水锤吸纳器	活塞式水锤吸纳器是一种用于消除管线中因多种原因造成的水锤冲击波，保护管道及设备不受破坏的装置。利用活塞上腔室中空气的胀缩，使突发的冲击波得到缓冲而缓解了力度，最大程度地避免因巨大的水锤冲力造成的设备损坏。该装置结构简单，选材精良，使用寿命长

参 考 文 献

- [1] GB/T 20203—2017 管道输水灌溉工程技术规范
 - [2] GB 50013—2018 室外给水设计标准（附条文说明）
 - [3] GB 50265—2022 泵站设计标准（附条文说明）
 - [4] GB 50268—2008 给水排水管道工程施工及验收规范
 - [5] NB/T 35021—2014 水电站调压室设计规范（附条文说明）
 - [6] SL 655—2014 水利水电工程调压室设计规范（附条文说明）
 - [7] CECS 193—2005 城镇供水长距离输水管（渠）道工程技术规程
 - [8] T/CEC 5010—2019 抽水蓄能电站水力过渡过程计算分析导则
 - [9] AWWA C512—2015 Air-Release, Air/ Vacuum, and Combination Air Valves for Waterworks Service
-