

ICS 91.140.60

P 41

团 体 标 准

T/HNCJ: GSA 0002-2021

城镇供水管网压力管理技术实施指南

Technical Implementation Guidelines for Pressure Management of Urban Water
Supply Networks

2021-04-30 发布

2021-06-01 实施

湖南省城乡建设行业协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义	1
4 基本要求	2
5 稳态压力管理.....	3
5.1 稳态水力模型.....	3
5.2 压力分区.....	4
5.3 稳态压力调控.....	4
6 瞬态压力管理.....	5
6.1 瞬态水力模型.....	5
6.2 瞬态压力控制.....	6
7 控制系统	6
7.1 系统组成及功能.....	6
7.2 控制流程.....	7
8 实施效果评估.....	8
附：条文说明	9

前 言

本指南是在总结实践经验并广泛征求意见的基础上，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》的规定并参考有关国内外标准编制而成。

本指南由湖南省城乡建设行业协会管理并负责解释。在执行过程中，如发现本规程条文中需要修改和补充之处，请将有关资料和意见函寄至株洲南方阀门股份有限公司（地址：湖南省株洲市天元区黄河南路 215 号，邮政编码：412007）。

主 编 单 位： 株洲南方阀门股份有限公司
湖南大学

参 编 单 位： 衡阳水务投资集团有限公司
株洲珠华水工业科技开发有限公司
株洲珠华智慧水务科技有限公司
湖南斯百通智水系统有限公司
湖北大洋塑胶有限公司
湖南旺坤管业有限公司
湖南华振供水设备有限公司
湖南联塑科技实业有限公司

主要起草人员：黄 靖 许仕荣 唐仲民 徐秋红 罗剑宾 欧立涛 吴若希
汪 宇 李朝红 李 滔 晏永楚 成志坚 胡 毅 熊耀奇
主要审查人员：施 周 邱振华 周 健 周成湘 谢水波 段正湖 贺海生

城镇供水管网压力管理技术规程

1 范围

本指南主要内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、基本要求、稳态压力管理、瞬态压力管理、控制系统、实施效果评估。

本指南适用于城镇供水管网，主要用于指导供水单位开展供水管网的压力管理。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本指南的引用而成为本文件的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本文件，然而，鼓励根据本文件达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本文件。

GB 50013 室外给水设计标准

GB 50265 泵站设计规范

GB 50268 给水排水管道工程施工及验收规范

GB/T 17219 生活饮用水输配水设备及防护材料的安全性评价标准

CJJ 92 城镇供水管网漏损控制及评定标准

CJJ 207 城镇供水管网运行、维护及安全技术规程

CECS 193-2005 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程

CECS 237 给水钢塑复合压力管管道工程技术规程

CECS 419 中小型给水泵站设计规程

3 术语和定义

3.1

供水管网系统 water distribution network system

从水厂到用户之间的管道系统，包括管道系统上所有的建（构）筑物和设施等，如管网、泵站、水塔、水池、阀门、水锤防护设施以及仪器仪表等。

3.2

管网拓扑结构 network topology

组成供水管网系统的各水力组件连接的关联性。

3.3

水力组件 hydraulic unit

组成管网系统的单一水力部件，如水池、泵、管道、止回阀、空气阀、控制阀、空气罐、水锤消除器、减压阀等。

3.4

供水管网压力管理 pressure management of water distribution network

在确保供水系统安全运行并满足供水服务压力的前提下，通过泵组和阀门等设施对供水

管网运行压力进行调控的管理模式，包括稳态压力和瞬态压力的控制。

3.5

稳态水力模型 steady-state hydraulic model

对输水系统中的管段流量、节点压力及水池水位等水力参数进行状态模拟和分析的计算机仿真系统。

3.6

瞬态水力模型 transient hydraulic model

对输水系统从某一稳态工况到另一稳态工况的过渡过程进行状态模拟和分析的计算机仿真系统。

3.7

模型校核 model calibration

通过核实基础数据、调整模型参数，使模型状态变量（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。

3.8

水锤 water hammer

也称水击，指由于某种外界原因（如阀门突然关闭、水泵机组突然停车）使管道中水的流速突然发生变化，从而引起压力急剧变化的现象。

3.9

水锤监测系统 water hammer monitoring system

能够实现供水管网水锤信息的采集、记录、分析、判定、告警与上传等功能的系统。

4 基本要求

4.1 供水单位应根据泵站分布、管网特点，通过压力调控控制供水管网漏失。

4.2 城镇供水管网压力管理应遵循以下基本原则：

- a) 因地制宜：结合城镇供水管网实际情况，科学分析压力需求和压力分布规律，因地制宜，科学制定压力管理方案；
- b) 统筹协调：统筹水量、水压、水质要求，确保供水安全；
- c) 分步实施：分步推进，逐步实施供水管网压力精细化管理。

4.3 供水管网压力管理实施路径：

- a) 通过初步分析，确定潜在的区域、仪器安装地点及用户服务要求；
- b) 建立水力模型，并利用实测数据进行校核；
- c) 借助水力模型进行分析，确定压力分区方案；
- d) 利用相关模型模拟计算潜在的效益；
- e) 选择合适的控制阀门和控制设备；
- f) 制订合适的压力控制方案，达到预期的结果；
- g) 成本和效益分析。

4.4 供水管网压力管理方案的制定应满足 GB 50013、GB 50265、CECS 419 的要求。

- 4.5 供水管网压力管理系统的验收应满足 GB 50268、CECS 237 的要求。
- 4.6 供水管网压力管理实施之前应评估供水区域现状压力分布情况和漏损率水平。
- 4.7 供水管网压力管理的实施不得影响城镇供水管网正常供水，宜实现数字化系统管理。
- 4.8 供水管网压力管理应与物联网、云计算技术相结合，实现监测数据实时远传、分析，达到实时的泵阀联调联控。
- 4.9 供水管网管理单位应根据稳态水力模型确定压力管理方案，通过瞬态水力模型优化水力瞬态过程，实现水泵和阀门等水力组件的智能调度。
- 4.10 压力管理设施中的涉水产品应符合现行国家标准 GB/T 17219 的有关规定。

5 稳态压力管理

5.1 稳态水力模型

- 5.1.1 供水管网管理单位应结合供水管网建立稳态水力模型，稳态水力模型宜采用压力驱动型。
- 5.1.2 稳态水力模型建模所需基本数据与参数：
 - a) 基础数据：供水流量、水库（河流）水位/吸水井水位、泵站布置、管线拓扑结构、管径、管长、标高、高位水池水位及容积等；
 - b) 设备及管道参数：水泵机组及其特性参数（曲线）、管道海曾-威廉系数（初始值）、阀门特性参数；
 - c) 用水数据。
- 5.1.3 供水管网拓扑结构（数据）宜从 GIS 系统中导出。
- 5.1.4 不同性质用户的用水规律可根据用水数据统计分析得出。
- 5.1.5 输配水管道水头损失计算公式宜采用海曾-威廉公式，海曾-威廉系数的初始值取值可通过实测或按表 5.1.5 确定。

表 5.1.5 海曾-威廉系数初始取值

材质	管道年份	尺寸 (mm)	C	
铸铁	新管	所有尺寸	130	
		使用 5 年后	≥300	120
			200	119
	100		118	
	使用 10 年后	≥600	113	
		300	111	
		100	107	
	使用 20 年后	≥600	100	
		300	96	
		100	89	
	焊接钢管	海曾威廉系数 C 的值与使用 5 年的旧铸铁管相同		
	铆接钢管	海曾威廉系数 C 的值与使用 10 年的旧铸铁管相同		
混凝土管或混凝土衬里	大管径、工艺精良、钢模板		140	
	大管径、工艺精良、木模板		120	
	旋转离心制造		135	
钢塑复合压力管			140	
玻璃钢管			110	
塑料管			150	

5.1.6 应根据实测的管网节点压力、管道流量校核稳态水力模型参数，模型精度应达到 CJJ 207 的要求。

5.2 压力分区

5.2.1 服务压力分布差异较大的供水管网，应通过稳态水力模型模拟，根据服务水压进行压力分区。

5.2.2 分区管理范围应由大到小逐级划分，形成完整的压力调控体系。

5.2.3 压力管理区域的范围应根据压力调控的需要划分。

5.2.4 压力分区应充分考虑与计量分区的统一性。

5.3 稳态压力调控

5.3.1 管网压力调控可通过送（配）水泵站出站压力控制、分区控压、泵站-减压阀联调联控等方式使管网压力达到合理水平。

5.3.2 送（配）水泵站应设置泵的调速装置，通过泵的组合及调速控制出站压力，当水厂

为重力供水时，出水管道上宜设置减压阀，以满足压力管理的需要。

5.3.3 分区控压时，应在分区入口处设置减压阀，可根据需要选择恒压控制、按时段控制、按流量控制和按最不利点压力控制等方式。

5.3.4 稳态压力调控优化模型的建立：优化模型以供水管网压力最小化为目标，以减压阀阀后压力、泵的组合及转速作为决策变量，以稳态水力模型、用户最小服务压力等为约束条件。

5.3.5 压力调控优化策略：通过压力调控优化模型的求解，获得减压阀阀后压力、泵的组合及转速等决策量，实施压力调控。

5.3.6 对于长距离供水管网，当管网最不利点压力不足时，宜通过设置管网中途增压泵站，采取逐级增压输送的方法降低出厂水入网压力。

5.3.7 压力控制宜采取逐步调减的方式。

5.3.8 在实施压力调控的同时，应对管网水质进行监测分析，发现水质问题应及时采取相应处置措施，保障管网水质安全。

6 瞬态压力管理

6.1 瞬态水力模型

6.1.1 供水管网管理单位应根据供水管网建立瞬态水力模型。

6.1.2 瞬态水力模型以稳态水力模型为基础，可利用特征线法建立。瞬态水力模型中水力组件类型及模型输入参数见表 6.1.2。

表 6.1.2 瞬态水力模型组件类型及输入参数

组件类型	输入参数	备注
节点	节点水头、节点实际用水量	
水库	水库水头	
管道	管道海曾-威廉系数、管长、管径	
水泵	水泵 Q-H 曲线、水泵全特性曲线	
止回阀	止回阀动态特性曲线	宜通过试验确定
空气阀	空气阀表压-吸排气性能曲线	宜通过试验确定
控制阀	阀门初始开度、阀门开度曲线、阀门阻力系数与阀门开度特性曲线	宜通过试验确定
调压罐	底面积、罐高、初始水位	

6.1.3 瞬态水力模型可以通过典型瞬态工况试验，以及对止回阀、空气阀等水力组件、水锤的在线监测来进行校核。其流程如图 6.1.3。

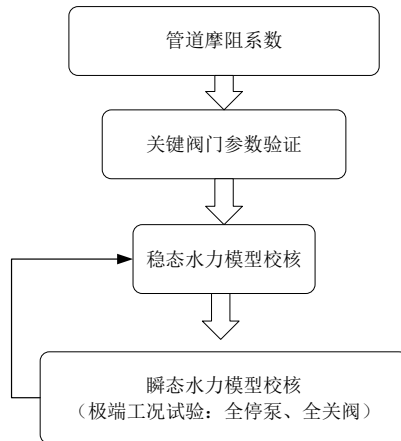


图 6.1.3 瞬态水力模型校核流程

6.2 瞬态压力控制

6.2.1 应参照 CECS 193-2005 中 6.2 的规定进行瞬态水力工况分析，模拟瞬态过程的压力和流量的变化，为瞬态压力控制提供依据。

6.2.2 瞬态压力控制策略：应用体系工程方法进行需求分析、架构设计、评估方法研究，形成水锤模拟分析、瞬态优化、管网优化、关键水锤防护组件、监测控制、应急管理的水锤防护整体策略，实现瞬态压力的控制。流程如图 6.2.2 所示。

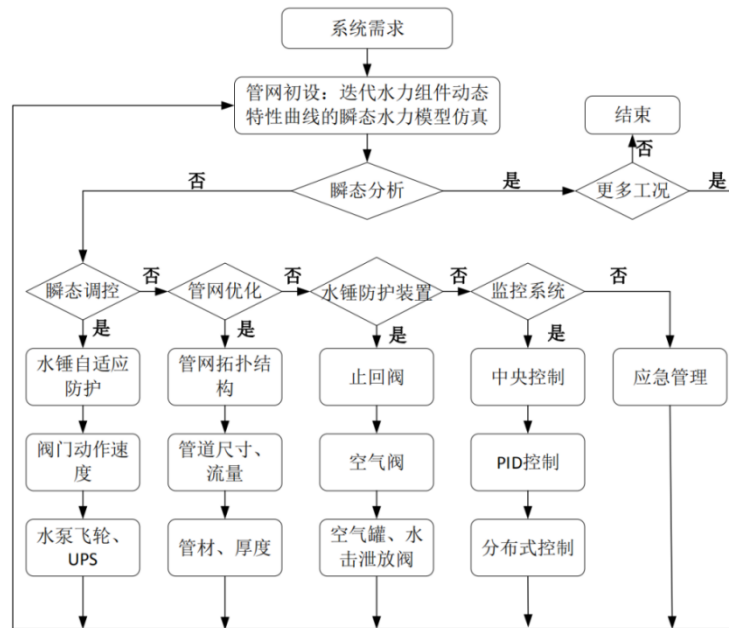


图 6.2.2 水锤防护整体策略

7 控制系统

7.1 系统组成及功能

7.1.1 控制系统由监测模块、控制模块及系统平台组成。

7.1.2 监测模块应能实现管网系统的水力参数监测、管道水锤与空气监测、设备运行状态监测，以及水锤分析、设备运行状态、故障等数据的采集、处理与分析。瞬态压力监测的采样频率应在 50Hz 以上，故障录波数据的采样频率为 2 倍以上。

7.1.3 送水水泵机组、控制阀、二次供水设备的进出水口应设置稳态和瞬态压力监测点，设备运行状态监测，并进行功能评估。

7.1.4 控制模块具有就地控制和远程控制两种模式，具备水力目标参数的闭环控制和位置目标参数的开环控制，满足恒压、时段、智能闭环等压力控制的要求。

7.1.5 监测与控制应有可靠的电源。在现场取电困难时，可采用管道微水力发电装置供电。

7.1.6 系统平台应具备以下功能：

- a) 日常接收感知设备和控制单元的信息交互、处理、存储和应用，包括结构化数据和实时数据库等多种数据存储方式，并作为建立数据中心的基础；
- b) 基于数学模型水锤分析和基于策略库进行控制策略制定；
- c) 对控制效果进行供水目标与安全评估。

7.1.7 监测与控制系统应在供水管网压力超过设定阈值时自动触发应急控制机制，工程竣工验收时，应对应急控制机制进行验证。

7.2 控制流程

7.2.1 控制流程按图 7.2.1 执行。

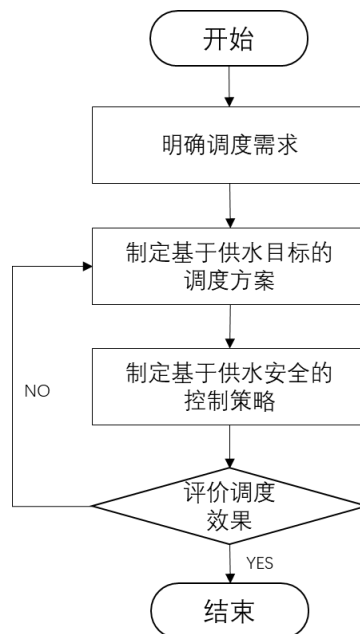


图 7.2.1 控制流程图

7.2.2 应明确调度需求，调度需求主要包括宏观调度目标、日供水量的规律性调整以及运行异常或应急事故处理等调度需求。

7.2.3 应根据稳态水力模型计算后的水力参数来制定满足供水目标的调度方案。

7.2.4 控制策略应满足供水安全的要求，包括多控制对象的动作顺序、时长，控制策略需进行瞬态水力模型安全性模拟，过程控制引起的压力峰值不超过正常工作压力的 1.3~1.5 倍，负压控制在 2.0m 以内。

- 7.2.5 控制流程实施后，应进行模型校核、可靠性评估和控制策略库更新。
- a) 控制过程中应同步进行水力参数监测、管道水锤与空气监测、设备运行状态监测；控制完成后，由实际的稳态监测和瞬态监测数据，分别对瞬态水力模型和稳态水力模型进行校核；
 - b) 应对控制过程的水锤与空气瞬态波形振荡曲线的幅宽、周期与安全性模拟进行相似程度比较。相似度偏离 30% 以内的控制策略，则可靠性高；否则可靠性低；
 - c) 建立控制策略库，控制策略制定过程中，优先采用控制策略库的控制策略，并根据过程控制的可靠性评估的结果更新控制策略库。

8 实施效果评估

- 8.1 供水管网压力管理实施后应进行实施效果评估。
- 8.2 管网压力管理实施效果评估可采取专家评议法，可通过审阅实施效果评估资料和实地考察等方式进行。
- 8.3 评估指标包括服务压力、漏失率、爆管频率、送水泵站吨水电耗等。专家依据国家行业相关标准，以及投入产出进行综合评价。
- 8.4 服务压力的评估应对比分析压力管理实施前后管网平均服务压力，管网服务压力可通过稳态模型模拟计算得出。
- 8.5 漏失率的计算方法应按 CJJ 92 执行。
- 8.6 爆管频率的评估应统计一个时期内的管网系统爆管发生频率，与实施压力管理之前的数据进行对比。
- 8.7 送水泵站吨水电耗的评估应对比分析压力管理实施前后的数据。

湖南省城乡建设行业协会团体标准

城镇供水管网压力管理技术规程

T/HNCJ: GSA 0002-2021

条文说明

目 次

4	基本要求	11
5	稳态压力管理.....	11
6	瞬态压力管理.....	17
7	控制系统	19
8	实施效果评估.....	20

4 基本要求

4.1 由于管网漏失水量以及部分用户用水量(直接由市政供水管网提供压力的非容积式用水设备)与供水管网压力具有正相关关系,合理的压力调控是降低管网漏失的重要手段。

5 稳态压力管理

5.1.1 稳态水力模型是压力管理的基础,因此供水管网管理单位应建立稳态水力模型。节点漏失水量是一个与供水管道压力相关的数值。而传统水力模型中,节点流量保持不变,与供水压力无关,这影响了供水管网模型的精度。因此,面向漏损控制的水力模型宜采用压力驱动型稳态水力模型。该模型将节点水量分为两部分:节点用水量和节点漏失水量。节点漏失水量被看作压力的函数,分配到各个供水节点。用公式表示为:

$$q_{il} = a_i H_i^N \quad (5.1.1-1)$$

式中: q_{il} 为第 i 个节点的漏失水量;

a_i 为第 i 个节点的漏失系数,一般通过实际管网的漏失量反算得出;

H_i 为第 i 个节点的节点压力;

N 为漏失指数,宜通过试验获得,当无试验资料时,可取 $N=1.18$ 。

则压力驱动型管网水力模型中的节点水量为:

$$Q_i = q_{iu} + q_{il} \quad (5.1.1-2)$$

式中: Q_i 为第 i 个节点计算节点水量 (m^3/s);

q_{iu} 为第 i 个节点用户用水量 (m^3/s)。

节点流量确定后,通过节点连续性方程和环路能量方程建立模型。方程表示如下:

$$\begin{cases} \sum_{j \in \phi_i} q_{ij} + Q_i = 0 \\ q_{ij} = \frac{(H_i - H_j)^{1/m}}{s_{ij}^{1/m}} \\ \sum_k h_{ij} = 0 \end{cases} \quad (5.1.1-3)$$

式中: i 、 j 为节点编号;

k 为环编号;

ϕ_i 为所有与 i 相连的节点;

q_{ij} 为管段流量 (m^3/s);

H_i 、 H_j 为节点压力;

h_{ij} 为水头损失 (m);

m 为水力指数;

s_{ij} 为摩阻系数。

上述水力模型中考虑了压力对节点漏失水量的影响,使得模型与实际管网更加相符,能够提供更加精确的管网水力分析

5.1.5 钢塑复合管的海曾-威廉系数的初始值取值依据 CECS 237。

5.1.6 管网模型的精度直接影响压力分区、漏失量的计算、方案评估的结果。只有当模型精度达到相关要求时才能进行模拟分析以指导压力管理。

管网稳态水力模型校核的参数主要为节点流量和管道摩阻系数（海曾-威廉系数）。管道海曾-威廉系数校核的原理是：将管道海曾-威廉系数作为变量，将实测值与模型计算值的差值平方和作为优化目标，通过优化算法求解最优管道海曾-威廉系数组合。基于粒子群算法的校核流程如下图：

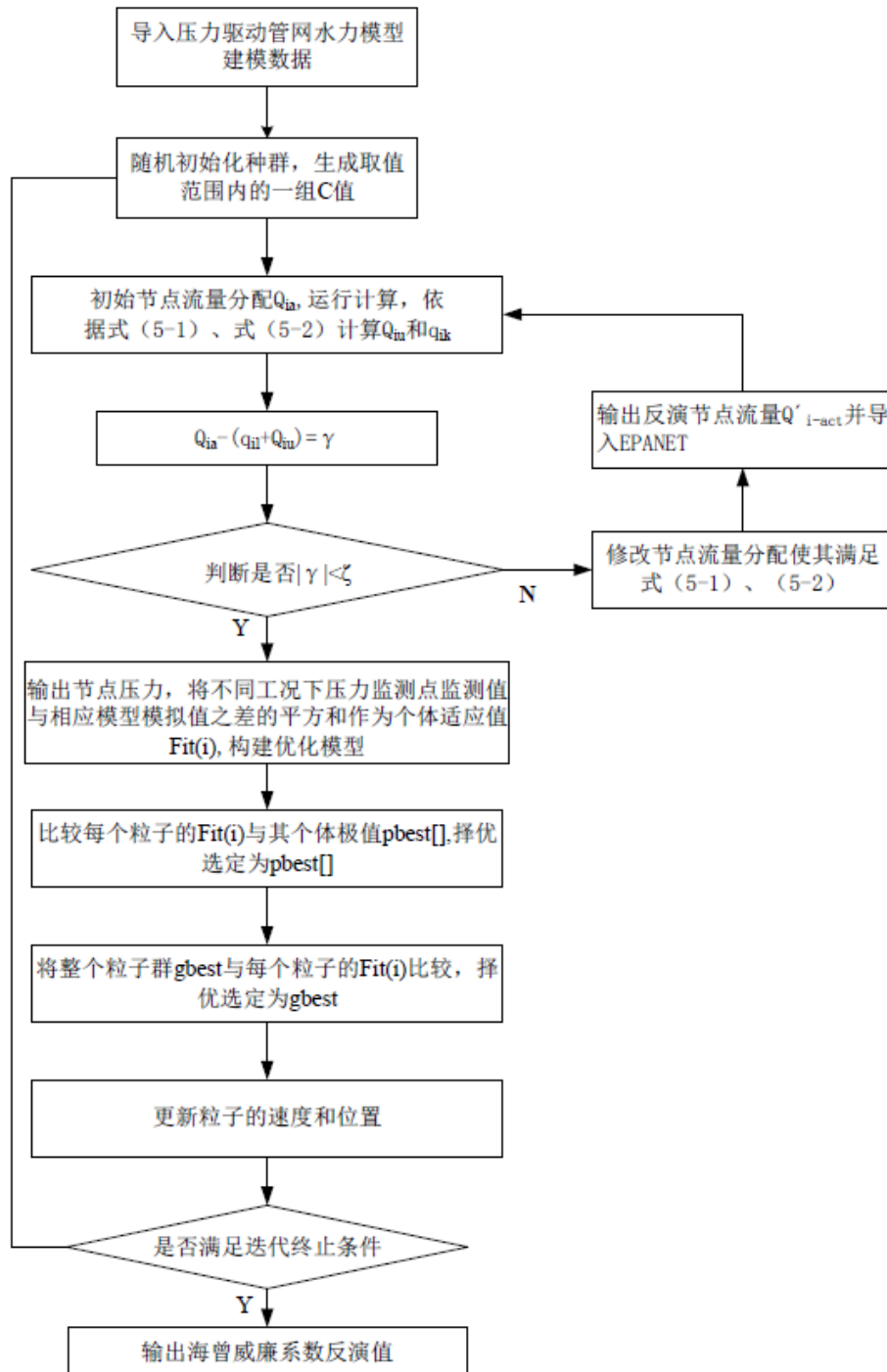


图 5.1.6 海曾-威廉系数校核流程

5.2.4 管网压力往往会因规模较大和高程变化较大等原因而分布不均，可以通过分区压力管理的方式，对各个区域的管网压力进行合理调控。

管网压力分区是根据压力相似性原则进行的分区模式，通过将管段截断或者把管道上的阀门组件关闭以达到各区域之间相互独立。通过对压力分区子区域进行压力调控，使得管网压力分区能起到压力控制的作用。区域计量分区（DMA）是将管网分割成若干个具有明显界限且相对独立的区域，并在每个区域的进口和出口安装流量计，从而起到区域计量的作用。另外，通过监测各个区域进流量与出流量，可以测量各区域的夜间流量，DMA分区又能起到漏损定位的作用。根据管网实际情况，压力分区还需与区域计量分区（DMA）相结合。

由于压力分区要保证每个分区中节点的自由水头相近，拓扑结构相连，所以基于节点的自由水头 H 、 X 坐标和 Y 坐标三个参数，用 BFSN 聚类算法对节点进行三维聚类。

首先，根据节点自由水头 H 、 X 坐标和 Y 坐标计算 $d(i, j)$ ，将计算值纪录到相异度矩阵中。然后，从任意一个节点开始，根据广度优先原则，以此搜索满足小于参数 r 的该节点的邻居，通过判定该邻居是否满足所设置的阈值 λ ，如果符合条件则将其与之归为一类。最后重复上述过程直至所有节点完成聚类。

本指南建议采用欧几里得距离计算任意两节点之间的相异度。如果直接采用欧几里得距离进行 BFSN 聚类分区，坐标属性值与节点自由水头相差很大，坐标值会覆盖节点自由水头，使得节点自由水头对距离的影响较小。故需对自由水压和坐标这两种数据进行归一化处理。数据的标准化是数据挖掘的基础，即将数据按比例缩放，使数值在一个小的区间里。其中最典型的就数据的归一化处理，即将数据统一映射到 $[0, 1]$ 区间上。数据的归一化处理可以有效的消除数据之间的相互影响。常见的归一化方法有离差归一化、标准差归一化和比例归一化三种，具体如式（5.2-1）所示。离差标准化是通过样本数据的最大值与最小值作的线性变换。这种方法有一个弊端就是当有新数据加入时，可能导致最大值和最小值的变化，则需要重新定义。标准差归一化是通过样本数据的均值与标准差作的变换，使归一化后的数据满足正态分布。比例归一化是按各数据所占的数据之和的比例进行的归一化，是最简单的一种归一化方法。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{离差归一化: } y_i = \frac{x_i - (x_i)_{\min}}{(x_i)_{\max} - (x_i)_{\min}} \\ \text{标准差归一化: } y_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \text{ 其中 } \mu \text{ 为均值, } \sigma \text{ 为标准差} \\ \text{比例归一化: } y_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \end{array} \right. \quad (5.2-1)$$

采用比例归一化方法对节点自由水头 H 、节点 X 坐标和节点 Y 坐标这三个参数进行归一化处理，然后计算欧几里得距离。任意两节点的欧几里得距离公式如下式：

$$r_{ij} = \sqrt{(H_i - H_j)^2 + (X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (5.2-2)$$

MATLAB 中的 `pdist` 函数可以计算节点中两两之间的距离。`pdist` 函数的使用形式有以下几种：

$$Y = \text{pdist}(X)$$

$$Y = \text{pdist}(X, 'metric')$$

$$Y = \text{pdist}(X, @distfun)$$

$$Y = \text{pdist}(X, 'minkowski', p)$$

其中, X 为一个 $m \times n$ 矩阵, 可以看做大小为 n 的 m 个矢量; Y 为长度 $(m-1) \times m/2$ 的矢量, 包含距离信息, 也常称为距离矩阵; 'metric' 是指相似程度衡量的类型, 常为距离和相似系数; @distfun 表示调用距离函数; 'minkowski' 是闵可夫斯基距离; p 为闵可夫斯基距离计算的过程中的幂次。用 squareform 函数将 Y 转化为 $m \times m$ 的方形矩阵, 即相异度矩阵。squareform 函数的使用形式为: $G = \text{squareform}(Y)$ 。

按最高时工况进行 BFSN 聚类分区, 得到分区方案后对管网进行 24 小时工况进行模拟, 以节点压力是否满足供水服务水平来判定聚类分区方案的可行性。BFSN 算法采用 MATLAB 编程, 其主要分析步骤如下:

- (1) 将最高时工况下所有节点中的第一个节点归为一类;
- (2) 取下一个节点, 用公式 (5.2-2) 计算下一个节点与第一个节点之间的距离 r_{ij} ;
- (3) 判断条件 $r_{ij} < r$, 如果成立, 则进行下一步, 否则返回上一步;
- (4) 判断条件该节点是否满足加入类的阈值 λ , 即 $\left[\sum_{i=1}^m X_i \right] / m \geq \lambda$, 如果满足, 则把节点

和第一个节点归为聚类一并从原始节点组中剔除该节点, 否则返回步骤 (2);

(5) 完成聚类一后, 判断剩余节点数目是否大于 0, 如果不满足, 则输出聚类结果, 否则将剩余节点中的第一个节点作为聚类二的第一个节点, 返回到 (2), 直到满足条件为止。

BFSN 聚类分区的流程框图如图 5.2-1 所示。

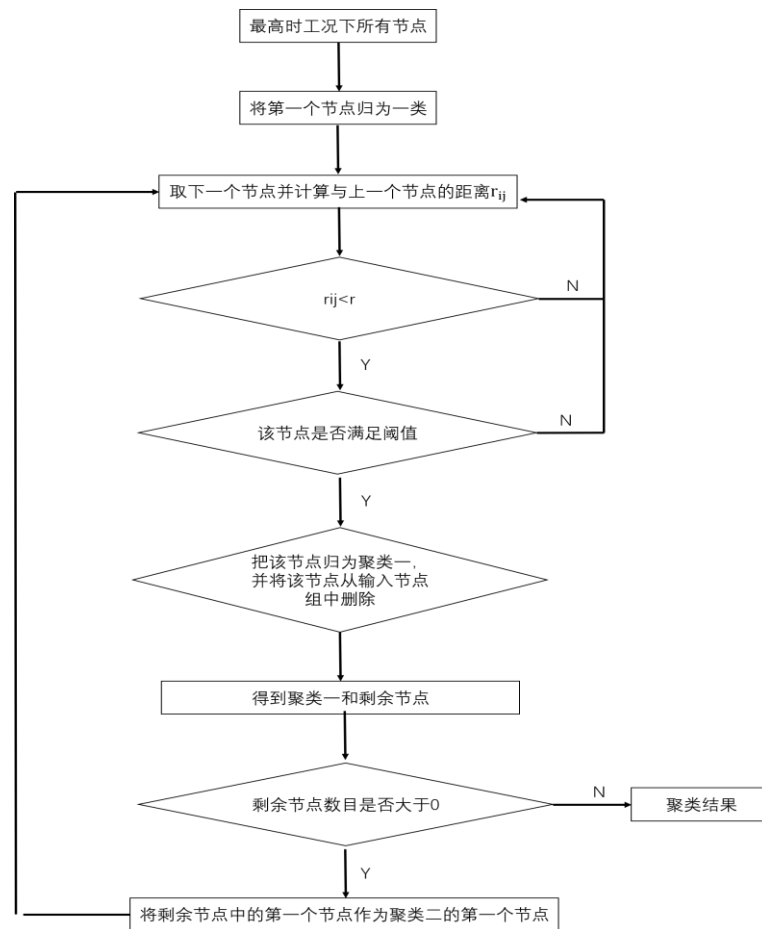


图 5.2-1 BFSN 聚类分区的流程框图

5.3.3 减压阀是一种自动控制阀，它可以降低入口处的高压，保证除了非恒定流和变化的入口压力之外水流可以在出口处维持低压状态。减压阀通过自动调节进行压力控制，因此下游的水力坡度线会保持在一个设定的数值。减压阀按压力控制方式主要可分为恒压控制、按时段控制、按流量控制和智能控制等方式。

5.3.5 管网压力管理宜采取泵站协同阀门的调控方式。首先，在进行了压力分区之后，在分区入口处设置减压阀；然后，以供水管网压力最小化为目标，以减压阀阀后压力、泵的组合及转速作为决策变量，以压力驱动节点流量模型、节点最小服务压力等为约束条件，建立阀门协同泵站调控的压力优化模型。

阀门协同泵站调控压力主要的变量是变速泵的转速比和减压阀的阀后压力。所以选择这两个变量作为阀门协同泵站调控的压力优化模型的决策变量。阀门协同泵站调控的压力优化模型的目标是寻求最优变速泵的转速比和减压阀的阀后压力设置值，在满足管网最小服务压力的前提下最大程度地减少管网富压。

(1) 目标函数

压力优化模型的目的就是以最大程度地降低整个管网内压力，故以供水管网节点水压与最小服务水压的差值平方和作为目标函数，其表达式如下：

$$F(x) = \sum_i^N (P_i - P_{\min})^2 \quad (5.3-1)$$

式中， i ——节点编号；

P_i ——节点 i 的自由水压， m ；

P_{\min} ——最小服务水头， m ；

N ——供水管网中节点数。

(2) 约束条件

压力驱动型水力模型能够更好地吻合实际管网运行工况，故阀门协同泵站调控压力采用该水力模型来模拟实际管网的压力调控。除了满足该水力模型的约束外，压力优化模型的建立还需考虑节点服务压力、变速泵的转速比、减压阀的阀后压力设置值等约束。

a) 压力驱动型水力模型约束

压力驱动型水力模型约束与传统水力模型约束相类似，均包括节点连续性方程和能量方程，具体如下式所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } P_i \geq H_d \text{ 时 } \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \in N_i} \frac{(P_i - P_j)^{1/m}}{s_{ij}^{1/m}} + Q_{i-d} + k_i P_i^n = 0 \\ \sum_l h_{ij} = 0 \end{array} \right. \\ \text{当 } H_{\min} \leq P_i \leq H_d \text{ 时 } \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \in N_i} \frac{(P_i - P_j)^{1/m}}{s_{ij}^{1/m}} + Q_{i-d} \left(\frac{P_i - H_{\min}}{H_d - H_{\min}} \right)^{1/m} + k_i P_i^n = 0 \\ \sum_l h_{ij} = 0 \end{array} \right. \\ \text{当 } P_i \leq H_{\min} \text{ 时 } \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \in N_i} \frac{(P_i - P_j)^{1/m}}{s_{ij}^{1/m}} + k_i P_i^n = 0 \\ \sum_l h_{ij} = 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (5.3-2)$$

式中， H_d ——节点临界水压， m ；

H_{\min} ——节点最小供水水压， m ；

N_i ——与 i 相连的节点；

P_i, P_j ——节点自由水压， m ；

m ——水力指数；

s_{ij} ——摩阻系数；

Q_{i-d} ——节点额定用水量， L/s ；

k_i ——节点漏失系数；

n ——漏失指数；

l ——环号；

h_{ij} ——水头损失， m 。

b) 节点服务压力约束

各节点服务压力需满足最小服务水头的要求，如下式所示：

$$p_i \geq p_{\min} \quad (5.3-3)$$

式中, p_i ——节点 i 的自由水压, m ;

p_{\min} ——最小服务水头, m 。

c) 转速比约束

水泵的合理转速比为 0.6-1 之间。因为转速过低时, 就会使得离心泵的效率过低; 而转速过高时, 一方面会使泵本身发生磨损, 减少泵使用的寿命, 另一方面当转速达到临界转速, 即水泵机组产生共振时的转速值, 使机组产生共振现象从而使机组遭到破坏。

$$0.6 \leq n_b \leq 1 \quad (5.3-4)$$

式中, n_b ——转速比。

d) 阀后压力约束

如果阀后压力设置值高于阀前压力, 则导致减压阀完全关闭, 分区内压力为 0。所以阀后压力必须要低于阀前压力, 同时也需保证足够的服务水压。

$$P_{\min} < X \leq X_b \quad (5.3-5)$$

式中, X ——减压阀阀后压力值;

P_{\min} ——最小服务水头, m ;

X_b ——减压阀阀前压力值。

5.3.6 为了满足管网末端的供水服务压力, 出厂水压力一般较高, 且输水距离越远出厂压力也越高, 这样导致水厂附近的供水管网压力远远超出实际需求, 这既增加能耗, 也会导致漏水增加。采取管网中途设置增压泵站的方法, 可以有效降低水厂的出厂压力, 当水流至增压泵站前时, 压力已经逐步下降到接近最低服务压力了, 可通过泵站提升压力, 再往远端输送, 这样管网的压力相对平衡, 能耗减少, 漏水和爆管的机率也会减少。

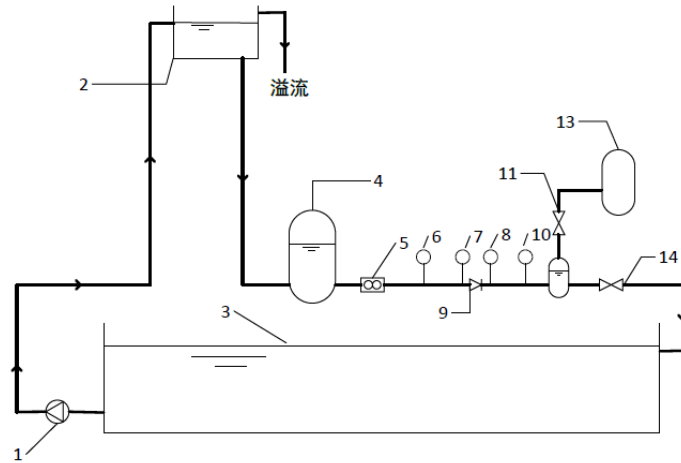
5.3.7 即使压力控制后用户服务压力满足相关标准和需求, 用户对压力的降低仍然存在适应过程, 在此过程中容易引起用户对供水服务的抱怨, 因此本条文规定宜采取逐步调减的方式。

5.3.8 进行压力控制时, 边界阀门的关闭通常会导致管线中水流方向或流速发生较大变化, 有可能造成管网水的浊度等指标升高, 因此应采取适当措施保证水质安全。

6 瞬态压力管理

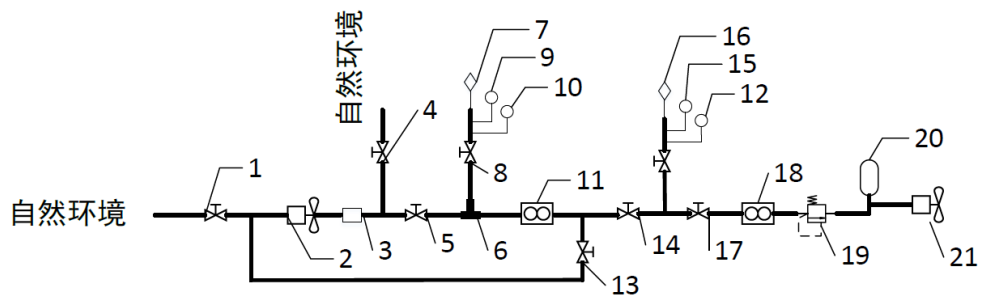
6.1.1 水锤是导致管网老化和损坏的主要原因, 导致管网漏失量的增加, 最终产生爆管。瞬态水力模型可模拟瞬变流引起的压力和流量变化, 用以指导控制瞬态过程对管网漏失的影响。

6.1.2 止回阀、空气阀、控制阀特性应通过试验确定。试验装置示意图分别如图 6.1.2-1、图 6.1.2-2、图 6.1.2-3 所示。



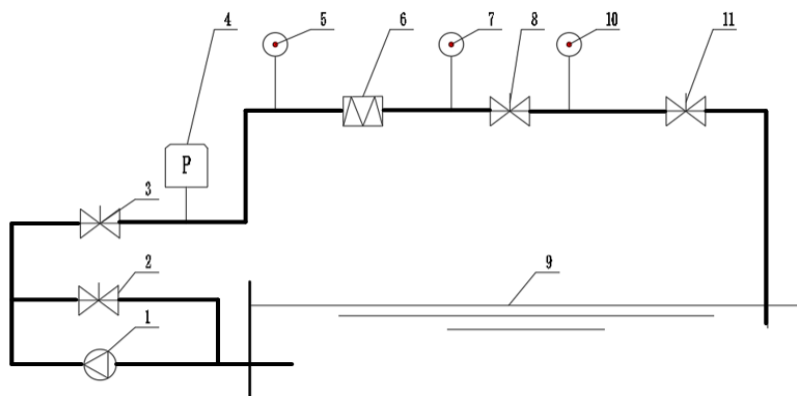
1、泵；2、水箱；3、水池；4、上游空气罐；5、流量计；6、7、8、10；压力传感器；9、试验阀；11、空气阀；12、高压空气罐；13、空气罐；14、流量控制阀

图 6.1.2-1 止回阀动态特性试验装置示意图



1、4、5、8、13、14、17、隔离阀；2、21：压缩机；3、整流器；6、T型管道；7、试验空气阀（吸气）；9、12、压力表；10、15：温度计；11、18、流量计；12、高压空气罐；16、试验空气阀（排气）；19、减压阀；20、空气罐

图 6.1.2-2 空气阀试验装置示意图



1、泵；2、控制阀；3、上游节流阀；4、调压罐；5、温度传感器；6、流量计；7、10、压力传感器；8、试验阀；9、水池；11；下游节流阀

图 6.1.2-3 控制阀试验装置示意图

6.2.2 瞬态压力调控是通过水锤防护组件来实现的，关键水锤防护组建主要包括：

a) 止回阀：

(1) 无阻尼式止回阀：旋启式止回阀、轴流式止回阀、快闭式止回阀、球形止回阀、橡胶瓣止回阀

(2) 阻尼式止回阀：水力自适应型（多功能水泵控制阀、多功能斜板阀）、主动控制型（液控蝶阀、液控球阀、液控偏心半球阀）。

b) 空气阀

(1) 吸气阀：安装在管道上的通气结构，只进气不排气，避免管道负压。

(2) 微量排气阀：自动排出管道中水析出的空气。

(3) 高速进排气空气阀：当管道充水时可以高速地排除管道中的空气，管道放空时自动快速吸入空气保持排水畅通。

(4) 复合式空气阀：具有微量排气和高速进排气功能。

(5) 防水锤空气阀：在管道正常运行或水泵启动过程中排除管道内积气，防止起泵水锤并提高输水效率，在管道负压时，能快速进气避免液柱分离且印制和缓解弥合水锤。

c) 液位控制阀（浮球阀）

安装在水池、水塔等贮配水设备的进水管道上，作为液面控制用。当液面上升至预定水位时，阀门自动关闭；当液面低于预定水位时，阀门自动开启进行补水。主要分为浮球式与智能液位控制式。浮球阀在启闭时，会产生瞬态压力波动。

7 控制系统

7.1.2 水锤监测是通过大于 50Hz 的高频压力采集，通过对水锤瞬态变化超过正常工作压力的 1.3~1.5 来判断，为了还原其压力变化的瞬态过程分析成因，在发生水锤的瞬间，数据采集频率应提高至正常采集的 2 倍以上。

空气监测考虑成本因素，现阶段不宜采用全管网空气探测的方式，因此在将空气监测的载体置于质量合格空气阀，并对空气阀的运行状态进行监测，原理上依然是在空气阀内采用高频压力监测采集数据，并结合空气阀的吸排气状态下压力变化曲线特征，对空气阀的运行状态进行判断，空气阀的运行状态正常，证明空气引起水锤的诱因排出。

7.1.3 水泵机组、控制阀、二次供水设备操作，直接影响管网内压力稳态变化与瞬态变化，因此为实现管网压力管理，应对此类设备进行稳态和瞬态的压力监测。

7.1.4 为提高控制效率应在传统的就地控制模式上增加远程控制模式，满足供水用水的需求，实现区域内恒压，不同用水时段控压，以及保障关键位置的水压为目标的压力控制等多种方法结合的综合压力管理。

7.1.5 当监测与低功耗控制的现场取电困难，而市区内不便随意安装风光发电装置，蓄电池供电延续性不强，恶劣环境可靠性差，因此可采用微水力发电装置供电。

微水力发电是利用管道水流小功率发电，持续的能量转换获得长期电能，并采用蓄电池蓄能实现异常情况下的短时供电。

7.1.6 结构化数据和实时数据库是保障系统稳态与瞬态监测功能的基本。

控制策略制定需要保障瞬态过程控制的安全性，策略库是提高策略制定效率的有效手段。

只有实现调度目标和过程安全的调度控制才能保障供水目标和运行安全,其控制策略更新至策略库,有利于新调度需求下控制策略制定的效率与质量。

7.1.7 供水管网压力超限是不符合工程设计和不能满足供水目标的现象,因此控制系统应具有在超限工况下的自动控制机制,为确保该机制的有效性,需在管网竣工时进行验证。

7.2.2 所有的水力组件的调度控制,均需基于调度目标,如正常的供水水力参数调整、应急关阀、区域内压力保障等。

7.2.3 调度方案基于调度目标,包括调度对象和对象控制目标。通过稳态水力模型仿真,确定调度的对象(如水泵机组、阀门)和调度目标(例如某泵站当前出口压力为 35m,增加 10m 压力终至 45m 压力;减压阀 A 阀后当前压力为 27m,增加 2m 水头终至 29m 水头;减压阀 B 阀后当前压力为 28m,增加 1m 水头终至 29m 水头)。

7.2.4 如何控制直接影响瞬态过程水锤压力峰值的大小,三者控制过程的顺序和时长即为控制策略。按上一举例,1#泵房与减压阀 AB,制定基于调度方案的控制策略,如下表。

调度顺序	调度对象	当前参数	调度目标	动作时长
1	泵站	出口压力 35m	出口压力 45m	30s
2	减压阀 A	阀门出口压力 27m	阀门出口水头 29m	8s
3	减压阀 B	阀门出口压力 28m	阀门出口水头 29m	5s

动作时间要求,可根据瞬态模型模拟,可设置间隔时间,如泵站达到 45m 水头稳定后 10s,执行第 2 顺序操作。

过程控制引起的压力峰值和负压要求依据 GB/T 50265。

7.2.5

a) 稳态与瞬态水力模型的仿真计算结果的准确性依赖模型边界条件的准确性,因此在不断的运行过程中采集稳态和瞬态数据,以不断的修正边界条件来校核模型精度,以求更加准确的模拟数据。

稳态模型校核办法是:通过对统计实际监测与模型模拟数据的误差率,对误差率大的模型边界条件进行校核,将差异大的边界条件进行修正。

瞬态模型校核办法是:通过对实测瞬态数据与模型模拟数据的相似度计算,相似度偏差大于 30%的,核对边界条件的差异,尤其是设备动态特性曲线的差异校核,对差异大的数据进行修正。

b) 相似度评估方法是采用控制前瞬态仿真数据和实测瞬态(水锤与空气监测)数据的波形振荡曲线的幅宽、周期等方面进行影响程度加权的相似度偏离评估控制策略的可靠性。

参考海绵城市模型仿真瞬态模型准确率要求不低于 30%,本文件故设定评估控制策略可靠性高的指标为偏离不超过 30%。

c) 控制策略库存储不同工况下的控制策略,为提高控制策略制定效率,经过管网长期运行,将达到控制目标的控制策略在评估后(仿真效果与瞬态监测偏离 30%以内的控制策略)更新至策略库,在相同工况下优先采用策略库中的控制策略。

8 实施效果评估

8.2 专家评议法是指由供水主管部门组织行业专家在实地考察的基础上,对压力管理应用成效进行集中评议,并出具专家评议结论的方法。