

管道内水锤效应及消能方式研究进展

何语涛, 刘力豪, 付娟娟, 王祖鲸
广安职业技术学院, 四川 广安 638000
DOI:10.61369/ERA.2026050031

摘 要 : 如何消除更高效的消除管网内的水锤效应是目前水利行业的重点关注方向。本文旨在重点整理现阶段主流的水锤消能方式, 并从其消能原理、消能优势、研究进展等维度进行阐述。本文分析了轴流式止回阀、多功能水泵控制阀、蝶式水泵控制阀等典型机械式被动消能装置; 在主动消能措施方面研究了变频恒压技术和智能控制系统在水锤消能方面的应用。最后, 总结出目前普遍使用的机械式水锤消能装置普遍面临的磨损、卡滞等安全隐患并提出未来可重点关注以特斯拉阀为代表的无动作消能结构, 以提升阀门装置的使用寿命与安全性。

关 键 词 : 水锤效应; 消能技术; 轴流式止回阀; 变频调速; 智能控制; 特斯拉阀

Research Progress on Water Hammer Effects and Energy Dissipation in Pipelines

He Yutao, Liu Lihao, Fu Juanjuan, Wang Zujing
Guang 'an Vocational and Technical College, Guang' an, Sichuan 638000

Abstract : How to more efficiently eliminate the water hammer effect in the pipeline network is currently a key area of focus in the water conservancy industry. This paper aims to comprehensively organize the mainstream water hammer energy dissipation methods at the present stage and elaborate on them from multiple dimensions such as energy dissipation principles, energy dissipation advantages, and research progress. Typical mechanical passive energy dissipation devices such as axial flow check valves, multi – function pump control valves, and butterfly pump control valves are analyzed. In terms of active energy dissipation measures, the applications of variable – frequency constant – pressure technology and intelligent control systems in water hammer energy dissipation are studied. Finally, it is summarized that the commonly used mechanical water hammer energy dissipation devices generally face safety hazards such as wear and jamming. It is proposed that in the future, more attention can be paid to the energy dissipation structure without moving parts represented by the Tesla valve to improve the service life and safety of valve devices.

Keywords : water hammer effect; energy dissipation technology; axial flow check valve; variable frequency speed regulation; intelligent control; Tesla valve

引言

随着国家“十五五”战略规划的正式发布其明确指出要加快建设现代化水网, 将管网建设作为核心内容, 完善国家水网主骨架与骨干输水通道。管道输送系统在国民经济中的地位不断提升, 然而如何预防水锤效应对管网系统造成的严重破坏成为目前水利管网建设面临的痛点问题。本文旨在梳理现阶段消除水锤效应的常用方法, 分别从消能原理、消能优势、研究进展等方面进行阐述, 并探讨了未来水锤防护技术的发展方向, 为管网安全的设计与维护提供理论参考。

一、水锤效应及其分类:

水锤效应 (Water Hammer Effect) 是一种在有压管道系统中常见的水力瞬变现象。其通常发生在阀门快速启闭、泵组突然启停、管道突然堵塞或破裂导致流体流速发生非稳态变化时,

流体由于惯性与可压缩性, 在管道内发生动能与压力能的瞬态转化, 进而引发管内压力产生剧烈、周期性震荡, 并以压力波 (水锤波) 的形式沿管系传播。可造成管网破裂、阀门损坏的严重事故。

常见的水锤效应一般可通过以下方式进行分类^[1]。

作者简介: 何语涛 (2005-), 男, 汉族, 四川南充人, 学生, 研究方向: 机器人工程。

表1 水锤效应的分类

	具体分类	分类依据与阐释说明
水锤的分类	按【关闭历时与水锤波的关系】分类	
	直接水锤	水锤波在管道里往返一次的时间 ($2L/a$, L 是管长, a 是波速) 大于等于阀门关闭的总时间 T 。
	间接水锤	水锤波往返时间 $2L/a$ 小于关闭历时 T 。
	启泵水锤	水泵启动时, 管道内水流从静止突然加速, 压力突变引发水锤。
	按【触发原因】分类	
	停泵水锤	水泵突然断电或停机, 高速水流失去动力, 因惯性作用在管道内形成压力波动。
	关阀水锤	阀门快速关闭, 阻断水流, 使水流动能瞬间转化为压力能, 是最常见的水锤类型。
	开阀水锤	阀门快速开启, 管道内压力突然降低, 引发反向的压力波动 (通常冲击力比关阀水锤小)
	刚性水锤	假设水和管道都是“绝对刚性”的, 不考虑水的压缩性、管道的弹性变形和阻力。 优点: 计算简单, 适合快速估算; 缺点: 误差大, 只能用于初步定性分析, 不能用于工程精确设计。
	按【计算模型的简化程度】分类	
	弹性水锤	考虑水的压缩性、管道的弹性变形和水流阻力, 是更符合实际情况的计算模型。 优点: 计算结果更精准, 是工程设计中主流的水锤分析方法; 缺点: 计算过程相对复杂, 需要专业软件辅助。
	按【水锤发生时“管道内水流状态”】分类	
	水柱连续型水锤	整个过程中管道里的水流是连续的, 没有断流。 特点: 压力波动相对平缓, 危害较小, 多数常规水锤属于这一类。
	断流弥合型水锤	管道内会出现局部水流断裂 (断流), 形成负压区, 当负压达到水的饱和蒸汽压时, 会产生水汽化; 随后断流的水柱重新弥合, 会产生剧烈的压力跃升, 冲击力极大, 是危害最严重的水锤类型之一。

二、主流消能方式及其典型结构

(一) 轴流式止回阀

轴流式止回阀是一种核心流体控制装置, 广泛应用于石油、化工及水处理等工业场景的管路系统中。通过其正向流动的阻力大小与反向止回性能的优劣可判断系统的能量消耗水平与运行稳定性。该阀门采用直流通结构, 具有压力损失低、响应快速等优点, 成为流体工程领域的研究热点^[2]。该阀门主要由阀体和阀芯两部分组成, 其中阀芯包括阀瓣、弹簧、导流罩、阀杆等部件, 当正向的介质力大于反向的介质力与弹簧的压力之和时, 阀瓣开启, 实现介质流通; 反之, 阀瓣关闭, 阻止介质逆流^[3]。

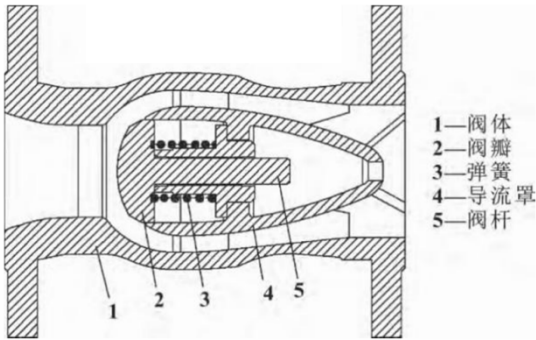


图1 轴流式止回阀结构示意图^[4]

为提升止回阀的综合性能, 有研究^[4]提出可将特斯拉阀结构用于阀芯支撑板, 该无动件流体阀依靠其特殊的几何结构实现正向阻力小, 反向阻力大的单向特性。正向流动时, 阀内的直弯流道和流体同向交汇实现加速; 反向流动时, 流体与流道结构耦合作用形成较大阻力。将特斯拉阀用于止回阀阀芯支撑板开孔可以增大正向流通面积以减小阻力, 同时消耗反向的流体能量来增强止流性能, 并削弱水锤效应^[5]。张立强等^[6]通过最优拉丁超立方抽样和流场仿真, 建立结构参数和性能之间的预测模型进行寻优, 筛选出最优解, 为轴流式止回阀的性能优化提供了新的设计思路。

(二) 多功能水泵控制阀

多功能水泵控制阀作为给排水系统中关键的水力控制设备,

广泛应用于给水系统与大口径离心泵的出口处, 尤其适用于短距离高扬程输水管线、易产生停泵水锤及水流倒流的工况^[7], 适用介质包括原水、清水、油品等。该阀以管道介质压力为动力源, 由主阀体及附设导管、针阀等组件构成, 集闸阀、逆止阀和水锤消除器等功能于一体。通过双控制室 (膜片式 / 活塞式) 实现主阀缓开、速闭、缓闭的分级动作, 抑制流速突变, 将水锤峰值控制在安全范围; 同时利用全通道流线型设计降低水力损失, 无需额外配电, 随水泵启停自动完成控制流程, 是一种可防止介质倒流、水锤及水积现象的智能型阀门。

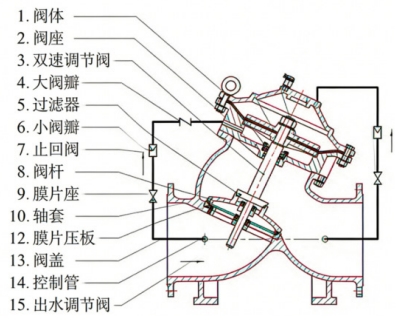


图2 多功能水泵控制阀结构示意图^[8,9]

李广英^[10]等围绕多功能水泵控制阀的旁通管道展开研究, 结合试验分析与理论推导, 探讨了旁通管直径与阀门启闭时间、水锤压力的关系, 推导了旁通管直径的计算方法。结果表明, 合理设计旁通管直径可使缓闭时间控制在6s 以上、水锤压力降低20%~30%, 显著改善了原工况振动、水泵倒转问题, 从而实现多功能水泵控制阀的水锤防护与安全运行。庄博涵^[11]等基于水锤理论与特征线法, 结合数值模拟与综合评价方法, 建立多功能水泵控制阀的数学模型, 研究主阀板与缓闭阀板不同面积比的防护效果, 并提出联合空气阀、空气阀调压室的防护方案。结果表明, 面积比5% 时防护最优, 联合方案能有效控制正负压、避免水泵倒转, 优于常规方案, 有效改善了停泵水锤、液柱分离等问题。

(三) 蝶式水泵控制阀

蝶式水泵控制阀广泛应用于长距离供水工程中大型离心泵的出口管路, 具有停泵水锤的防护功能, 适于远距离的输水管

线^[12]，通过控制快关、慢关的角度和时间，实现水泵的流速、流量，以及系统的最大、最小压力的有效调节。借助其液控驱动方式的特性，可与泵站机组联动控制，无需额外复杂的调控，是保障系统稳定运行的关键设备之一。

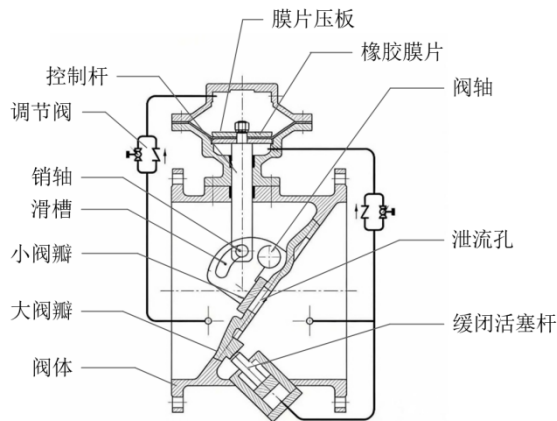


图3 蝶式水泵控制阀结构示意图

王丽等^[13]以山西庄头泵站为研究对象，通过水力过渡过程数学模型和控制变量法，建立两阶段液控蝶阀防护工况下的停泵水锤计算模型，结合数值模拟方法，分析了蝶阀关闭参数对管路压力和水泵转速的影响规律。研究表明，适当调整关闭参数可使管路最大压力降低10%以上，减小水泵倒转转速，为长距离供水工程中蝶阀的参数调试提供了数据参考。庄博涵等^[11]依据水锤理论和数值模拟，建立液控蝶阀与多功能水泵控制阀的对比分析模型，研究两种阀门在不同工况下的水锤防护效果，并提出蝶阀联动空气阀的复合防护方案。通过与多功能水泵控制单阀防护对比，发现复合防护对管路的压力调控精度更高，可以有效防止液柱分离现象，比单阀防护方案更好，改善了低扬程输水工程的水锤防护过程中适应性差的问题。

（四）变频调速恒压供水技术与智能控制阀门

在主动抑制水锤效应方面，变频调速恒压供水技术往往与智能控制系统互相配合使用，达到自动化运行与精准控制流量的目

的^[14]，从源头抑制水锤效应带来的危害。变频恒压供水技术目前主要依赖可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 得以实现^[15]，输入检测数据后，变频器经过PID计算调节电源频率和泵组转速。其优势在于不仅可以通过智能控制技术实现管网压力的恒定调控从而有效抑制因阀门启停而产生的水锤效应^[16]以外还可以通过变频技术，限制泵组启动时的过大电流避免了泵组的损坏^[17]。

现阶段对于变频调速恒压供水技术的研究多数集中于完成更安全、更节能的设计任务。杜明兵^[18]针对排水量不稳定情况设计恒压供水系统，解决了传统供水方式中水压不稳定、能耗高的问题。苏显勇^[19]构建了以最小能耗与稳定运行为目标的加权优化模型，实现泵组转速的智能协调与动态优化。

智能控制阀门依靠仿真模拟技术与智能优化算法相结合，来优化阀门操作从而控制输水过程中的水力过渡过程，可降低停泵状态下的水锤破坏作用^[20]。相比于传统阀门，其具备高精度流量控制、能耗降低等优势，是未来智能化农业灌溉、工业控制领域重点关注方向^[21]。目前，智能控制阀门的研究主要聚焦于提升智能控制系统的算法优化以完成提高响应速度、对流量的精度控制等目标^[22]。

三、总结与展望

综合来看，利用阀门的机械式特殊结构、变频恒压控制技术与智能控制系统，可有效减轻水锤效应对管道系统的巨大破坏，延长管网寿命，保障运行安全。目前水锤消能领域的研究主要集中于策略优化、阀门结构优化与性能测试等方向。然而，传统水锤消能结构多依赖活动部件实现反向截止，在流体长期冲刷和压力波动作用下，易出现磨损、卡滞甚至泄漏等安全问题，这一现状仍难以得到有效解决。未来可重点设计或改进以特斯拉阀为代表的特殊阀门——此类阀门无需依赖活动部件即可实现对流体方向的控制，仅通过特殊流道实现非堆成涡旋诱导，可极大的消散流体的动能，具有更强的工况适应性和运行可靠性，有望在复杂工况下有效减少安全事故的发生，为水锤防护技术提供新的发展方向。

参考文献

- [1] 金维, 姜乃昌, 汪兴华. 停泵水锤及其防护 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 蒋白懿, 李博, 刘培青, 等. 多功能水泵控制阀对短距离高扬程输水管线水锤防护效果的模拟研究 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(03): 171-174.
- [3] 刘灿, 王永宁, 范征, 等. 轴流式止回阀与水击泄放阀组合的水锤防护系统研究 [J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(S1): 9-14.
- [4] 赵奕飞. 基于特斯拉阀的流体减阻测试平台设计及减阻性能实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [5] 孙博宇. 考虑流固耦合的止回阀阀芯稳定性研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [6] 张立强, 左竣仁, 金俊坤, 等. 应用特斯拉阀结构的轴流式止回阀性能优化研究 [J]. 机床与液压, 2025, 53(24): 174-180.
- [7] 徐佳丽, 李佳帽, 金颖, 等. 老泵站改造多功能水泵控制阀应用研究 [J]. 价值工程, 2017, 36(27): 95-96.
- [8] CJ/T 167 - 2016. 多功能水泵控制阀 [S].
- [9] CJ/T 219 - 2017. 水力控制阀 [S].
- [10] 李广英, 冯玉柱, 及进册. 多功能水泵控制阀旁通管道的设计及工程应用研究 [J]. 阀门, 2026, (01): 1-5.
- [11] 庄博涵. 多功能水泵控制阀的水锤防护特性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [12] 邵建农, 于国峰, 冯玉柱, 等. 蝶式水泵控制阀的水锤防护功能及卡洛湖泵站的水力坡度计算 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(S2): 176-180.
- [13] 王丽, 吴建华, 李琨, 等. 庄头泵站蝶阀关闭参数对停泵水锤的影响 [J]. 中国农村水利水电, 2018, (04): 137-140.
- [14] 孔庆, 张治国, 马凤伟. 煤矿联合泵房供水系统智能化升级改造 [J]. 中国高科技, 2024, (18): 16-17+25.
- [15] 张铠舒, 于晶京. 基于 PLC 的变频恒压供水系统设计 [J]. 电动工具, 2025, (06): 36-39+44.
- [16] 陈远企. 智能变频恒压供水系统的应用研究 [J]. 机械管理开发, 2022, 37(06): 193-194.
- [17] 侯圣语. 基于 PLC 的变频调速恒压供水技术应用研究 [J]. 科学技术创新, 2023, (13): 209-212.
- [18] 杜明兵. 基于 PLC 的变频调速恒压供水系统研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (11): 34-36.
- [19] 苏显勇. 基于 PLC 与变频调速协同控制的化工泵站能耗优化策略研究 [J]. 化学工程与装备, 2026, (03): 95-97.
- [20] 王浩. 智能化控制阀在石油化工中的应用设计 [J]. 科技与创新, 2015, (21): 115-116.
- [21] 徐佳油. 农业滴灌系统智能阀门流量控制精度研究 [J]. 中国机械, 2025, (27): 79-82.
- [22] 胡一鸣, 董深, 吕谋, 等. 基于水锤防护的长距离高压输水系统阀门优化调控技术研究 [J]. 水电能源科学, 2025, 43(11): 143-147+124.