

国外某供水工程水锤分析及解决方案

张红辉

上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司 上海 200092

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19693

[摘要] 本文针对国外某大型供水工程,结合工程实际工况,采用专业水锤分析软件对输水系统的恒定流、瞬变流无保护工况及多种防护方案下的工况进行系统分析,识别水锤风险点,对比不同防护方案的效果,最终确定最优防护方案,为工程安全稳定运行提供技术支持。该工程具有高扬程、长距离、多级泵站、地形起伏大的特点,输水主管线总长约 59.34km,设计近期供水规模 30 万 m³/d,远期 40 万 m³/d,采用四级提升方式,总提升高度约 440m,单级扬程 110~150m,管线采用 DN1800 球墨铸铁管,运行过程中易产生严重水锤现象,威胁管道、水泵及阀门安全。

[关键词] 供水工程;水锤分析;瞬变流;防护方案;压力极值

引言

长距离、高扬程、多级泵站供水工程是保障大型区域生产生活用水的核心基础设施,其运行稳定性直接关系到民生保障与社会稳定。此类工程因管线绵长、地形起伏大、运行参数复杂,在泵站停机、阀门操作等工况下极易产生水锤现象,引发管道超压破裂、负压坍塌、设备损坏等安全事故,严重影响供水连续性。本文研究的国外某大型供水工程,采用四级加压输水模式,主管线总长 59.34km,总提升高度约 440m,近期供水规模 30 万 m³/d,远期 40 万 m³/d,管线穿越复杂地形,水锤风险突出。为防范水锤灾害,保障工程安全稳定运行,本文采用专业水锤分析软件,系统模拟不同工况下的水锤效应,识别安全隐患,对比优化防护方案,为工程设计、施工及运维提供科学的技术支撑,也为同类供水工程的水锤防护提供参考。

1. 工程概况

该供水工程是当地重要的民生工程,主要承担周边区域生产生活用水供给任务,水源取自某河流取水口,经取水构筑物取水后,通过四级加压泵站逐级提升,最终输送至末端山顶水池,实现全线供水。工程核心输水系统由四段主要管段组成,分别为取水口至水处理厂管段、水处理厂至一级加压泵站管段、一级加压泵站至二级加压泵站管段、二级加压泵站至末端山顶水池管段,各管段长度、地形条件及运行参数存在差异。工程采用 DN1800 球墨铸铁管,管道设计压力需满足不同工况下的运行要求,由于管线穿越地形复杂,多起

伏路段,且设计流量大、扬程高,在泵站突然停机、阀门操作不当等极端工况下,极易产生水锤现象,引发管道超压破裂、负压水柱拉断等安全隐患,因此开展系统的水锤分析及防护方案研究具有重要意义^[1]。

2. 水锤分析基础条件

本次水锤分析采用 PIPE2000 专业软件,运用波特性法(特征线法)模拟瞬变流过程,精准计算压力极值、流量变化等关键参数。阻力计算采用 Hazen-Williams 公式,压力流与重力流状态下管道粗糙系数分别为 130 和 125;管道波速根据球墨铸铁管特性取值 912~1069m/s,模拟总时长 1500 秒。分析设置三类工况:恒定流(近期、远期)作为基准,瞬变流无保护工况模拟泵站断电事故,瞬变流防护工况对比两种防护方案。控制目标为事故工况压力升高不超 0.3MPa,真空值不超 2m,保护设备并确保系统快速稳定^[2]。

3. 恒定流工况分析

恒定流工况是供水系统正常运行的基础,其分析结果为后续瞬变流水锤分析提供核心基准参数。本次分析分别针对近期小流量和远期大流量两种工况,重点监测各管段压力坡降、水泵运行参数及节点压力极值。近期小流量工况下,各管段运行稳定,水泵进口、出口扬程及总扬程参数平稳,最大压力均出现在泵站出口附近,最小压力位于沿线末端或水池位置,压力坡降均匀,无超压、负压现象,完全满足设计要求。远期大流量工况下,设计流量显著增加,导致管道沿程阻力增大,水泵扬程相应提升,各管段最大压力较近期有

所上升,但仍处于合理范围;最小压力与近期基本持平,未出现异常波动。整体而言,恒定流工况下整个输水系统运行稳定,各参数均符合设计标准,为后续瞬变流无保护及防护工况的水锤分析,提供了精准、可靠的基准数据支撑^[3]。

4. 瞬变流无保护工况分析

4.1 压力波动规律

泵站突然停运后,管道内水流速度迅速降低,由于惯性作用,水流会继续向前流动,导致泵站出口附近压力急剧升高,形成正水锤;同时,沿程高点及末端位置水流速度减小,压力快速下降,形成负水锤,部分节点压力降至饱和蒸气压以下,出现水柱拉断现象。系统压力波动呈现明显的周期性,

波动周期与管段长度、波速密切相关,长管段波动周期较长,短管段波动周期较短。其中,最长管段(水处理厂至一级加压泵站)波动周期约为60~80秒,最短管段(二级加压泵站至末端山顶水池)波动周期约为15~25秒,压力波动幅度随时间逐渐衰减,但衰减速度较慢,需较长时间才能恢复稳定^[4]。

4.2 压力极值分析

各管段在瞬变流无保护工况下(近期和远期)的压力极值汇总如下,其中最大压力单位为米,最小压力单位为米,负值表示负压,达到-9.5米时会出现水柱拉断现象。如下表。

表1 瞬变流无保护工况各管段压力极值统计表

管段范围	近期工况最大压力	近期工况最小压力	远期工况最大压力	远期工况最小压力
取水口-水处理厂	346.87	-9.50	364.05	-9.50
水处理厂-一级加压泵站	363.38	-9.50	471.45	-9.50
一级加压泵站-二级加压泵站	306.40	-9.50	415.25	-9.50
二级加压泵站-末端山顶水池	359.03	-2.78	350.61	-7.80

4.3 安全隐患识别

根据无保护工况模拟结果,该供水工程存在显著且严峻的安全隐患,主要集中在超压破坏与负压破坏两大维度。数据显示,管道最大压力峰值高达471.45米,远超管道设计承受范围,极易造成泵站、阀门及管线破裂,引发大规模泄漏事故;同时,多数管段负压降至-9.5米,已达到水柱分离临界值,导致水柱断流。当水流弥合时,将产生剧烈的弥合水锤,进一步放大压力冲击,不仅损坏管道结构,还会引发水锤泵效应,威胁全系统安全。综上所述,在无任何水锤防护措施的情况下,泵站突然停运将导致系统性崩溃,必须立即采取专项防护措施以消除风险^[5]。

5. 瞬变流防护工况分析

5.1 防护方案设计

针对无保护工况的严峻风险,本工程设计了套差异化的防护方案,旨在平衡防护效果、投资成本及维护便利性,具体设计如下。

方案一:多阀协同防护体系。本方案以“止回阀+压力波动预止阀+防水锤空气阀+复合空气阀”为核心,构建全周期防护网。速闭止回阀确保水泵零倒转,消除附加水锤;

DN500压力波动预止阀在超压时自动泄压,精准控制正水锤峰值;防水锤空气阀布置于沿程高点,快速进气阻断水柱分离,限制排气延缓弥合水锤;复合空气阀负责常态排气与低压补气,提供基础安全保障。该方案配置数量适中,投资省、占地小,维护简便^[6]。

方案二:空气罐增强防护体系本方案。在方案一基础上,引入气囊式空气罐作为核心增强装置。通过空气罐的可压缩性“吸纳”多余能量,有效抬高高压包络线,彻底消除水柱拉断风险。相比方案一,该方案可适当减少防水锤空气阀数量,远期仅需少量空气罐配合,且空气罐需定期补气,维护成本较高,占地面积大,整体投资略有增加^[7]。

5.2 防护效果分析

为验证防护方案有效性,本次对两种防护方案在近期、远期工况下的防护效果进行模拟分析,重点监测压力极值、波动幅度及水柱分离情况,确保满足水锤控制目标。

方案一防护效果良好,近期工况下各管段最大压力130.00~239.13m,最小压力-1.98~-0.63m;远期工况最大压力126.72~213.33m,最小压力-1.97~-1.66m。各项指标均符合要求,压力升高值不超0.3MPa,负压未达-2m,无

水柱拉断, 压力波动幅度减小、周期缩短, 系统可快速恢复稳定。

方案二防护效果优于方案一, 近期工况最小压力 -0.48~0.97m, 远期 -0.54~-0.50m, 负压控制更优, 部分管段近期无负压。但两种方案最大压力基本持平, 均满足控制目标, 方案二因增设气囊式空气罐, 防护更优, 但设备投资、占地面积及后期维护成本略高^[8]。

6. 末端阀门关闭工况讨论

本次同步分析末端阀门关闭工况下的水锤现象, 重点模拟两种场景, 探究其压力波动规律及安全风险, 为系统运行调节提供依据。第一种为仅关闭末端阀门工况, 模拟 DN1800 电动蝶阀历时 300 秒关闭、水泵不停转的情况。该工况下, 阀门前 200~220 秒阻力变化微弱, 后期才进入调节状态, 调节性能较差, 系统仅出现压力升高, 末端阀前最大压力达 52~160 米, 需泵站压力波动预止阀开启泄压, 易引发局部超压, 不建议采用。第二种为关闭与停泵协调工况, 阀门关闭 60 秒后, 泵站逐级关泵, 间隔 30~40 秒直至全部关停。此工况下压力波动显著减小, 泵站处最大压力 114~180 米, 末端阀前最小压力 -0.53~-2 米, 加装空气阀可避免负压。综上, 末端阀门关闭调节存在明显缺陷, 易造成机械破坏, 不建议用于系统停运或水量调节, 系统调节应依靠水泵关停与切换, 保障压力稳定^[9]。

7. 水锤防护设备综述

本次水锤分析涉及多种防护设备, 各设备功能、结构及应用效果存在差异, 协同发挥防护作用, 为工程设备选型提供可靠参考。静音止回阀采用弹簧轴向驱动, 水流速度为 0 时速闭, 可防止水泵倒转, 避免附加水锤, 有效保护水泵设备。气囊式空气罐内置气囊、气水分离, 通过空气可压缩性吸纳水锤多余能量, 能抬高低压包络线减少负压, 但投资略高、无法独立完成防护。压力波动预止阀为水力控制, 可自动感应压力开启泄压, 对泵站防护作用显著, 是正水锤控制核心。防水锤型空气阀带缓冲盘片, 快速进气、限制排气, 能防控沿线高点负压和弥合水锤。复合式空气阀具备低压进排和微量排气功能, 仅辅助防负压, 无防水锤作用。综上, 压力波动预止阀与防水锤空气阀是核心设备, 其余设备协同

配合, 可有效防控水锤风险^[10]。

总结

本文针对国外某高扬程、长距离、多级泵站供水工程, 采用 PIPE2000 软件, 对恒定流、瞬变流无保护及两种防护工况进行分析。工程输水主管线长 59.34km, 近期供水 30 万 m³/d、远期 40 万 m³/d, 无保护工况下存在严重超压(最大 471.45m)和负压(最低 -9.5m)风险。对比两种防护方案, 方案一(止回阀+压力波动预止阀等)防护效果良好、投资低、维护简单, 方案二防护更优但投资略高。最终推荐方案二, 同时建议依靠水泵关停调节水量, 加强设备调试维护, 保障工程安全稳定运行。

[参考文献]

- [1] 任国鑫. 松塔水库寿阳供水工程技改方案优化研究[D]. 太原理工大学, 2023.
 - [2] 张杰, 邹圆. 农村供水输水管道工程水锤防护关键技术研究[J]. 水利技术监督, 2026, (04): 136-139.
 - [3] 付永鹏. 香水水库供水工程水资源配置优化分析[J]. 黑龙江水利科技, 2026, 54 (02): 78-81+95.
 - [4] 李海洋. 某供水工程管道水锤计算及防护设备参数优化[D]. 西安理工大学, 2025.
 - [5] 黄治程. 长距离重力流供水工程余压发电改造调节保证研究[D]. 南昌大学, 2025.
 - [6] 祁长春. 农村规模化供水工程的水锤防护计算与研究[J]. 水利科技与经济, 2024, 30 (10): 26-31+37.
 - [7] 张童洲. 农村供水工程管网漏损成因及解决方法[J]. 农村实用技术, 2024, (08): 103-105.
 - [8] 高景, 曹津. 佳县某供水工程泵站水力过渡及防护方案分析[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52 (07): 76-78+121.
 - [9] 刘震泽. 太忻一体化滹沱河供水工程水锤防护措施研究[D]. 太原理工大学, 2024.
 - [10] 李宏亮. 那仁苏供水工程水资源供需平衡分析[J]. 陕西水利, 2024, (05): 38-40.
- 作者简介: 张红辉(1969年5月)男, 汉族, 浙江宁波, 本科, 高级工程师, 研究方向: 城市给水排水系统。