

文章编号:1673-9469(2024)02-0086-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.012

抽水蓄能电站输水管道区域环境振动分析及减振措施

茹松楠¹,周开涛¹,郑晓东^{2,3*},阮浩东^{2,3},沈一鸣^{2,3},姜新佩^{2,3}

(1. 国网新源控股有限公司,北京 100052;2. 河北工程大学 水利水电学院,河北 邯郸 056001;
3. 河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室,河北 邯郸 056038)

摘要: 为了探讨抽水蓄能电站输水管道区域环境振动的问题,结合实际工程的环境振动监测资料,采用 Midas-GTS 软件分析抽水蓄能电站输水管道区域环境在不同工况下的振动影响,并提出合理的减振措施。研究表明:库区上游靠近机组的区域环境振动分贝值均大于库区下游,库区下游靠近居民区的环境振动分贝值均大于居民区环境振动标准值,且严重影响居民的正常生活。由于抽水蓄能电站区域环境振源复杂,填充沟措施效果显著,且易施工,对类似的抽水蓄能电站工程具有一定的借鉴意义。

关键词: 抽水蓄能电站;区域环境振动;输水管道;减振措施;Midas-GTS

中图分类号:TV671

文献标识码:A

Environmental Vibration Analysis and Vibration Reduction Measures in Water Transmission Pipeline Area of Pumped Storage Power Stations

RU Songnan¹, ZHOU Kaitao¹, ZHENG Xiaodong^{2,3*}, RUAN Haodong^{2,3},
SHEN Yiming^{2,3}, JIANG Xinpei^{2,3}

(1. State Grid Xin Yuan Co., Ltd., Beijing 100052, China; 2. College of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056001, China; 3. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Resources of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to explore the issue of environmental vibration in the water transmission pipeline area of pumped storage power stations, combined with actual engineering environmental vibration monitoring data, Midas GTS software is used to analyze the vibration impact of the water transmission pipeline area environment of pumped storage power stations under different working conditions, and reasonable vibration reduction measures are proposed. The results indicate that the decibel values of environmental vibration in the upstream area near the unit are higher than those in the downstream area, and the decibel values of environmental vibration in the downstream area near the residential area are higher than the standard values of environmental vibration in the residential area, which seriously affects the normal life of residents. Owing to the complex environmental vibration sources in the pumped storage power station area, the filling ditch isolation measures have significant effects and are easy to construct, which has certain reference significance for similar pumped storage power station projects.

Key words: pumped storage power station; regional environmental vibration; water pipeline; vibration reduction measures; Midas-GTS

收稿日期:2023-11-14

基金项目:国网新源控股有限公司科技项目(SGXJKJ-2020-093);河北省自然科学基金资助项目(E2020402087)

作者简介:茹松楠(1981-),男,北京人,硕士研究生,高级工程师,从事水利工程施工方面的研究。

* 通信作者:郑晓东(1984-),男,河北保定人,博士,副教授,从事水工结构工程方面的研究。

目前国内在抽水蓄能电站设计、建设及运行维护等领域已经积累了丰富的经验^[1-2]。抽水蓄能电站具有高水头、高转速、双向运转等特点,在抽水蓄能电站运行过程中机组和厂房的振动问题非常普遍,国内外学者针对这类振动问题进行了大量研究。郭建强等^[3]分析了某大型抽水蓄能电站厂房强烈振动原因,并且提出了相关减振措施。徐丽等^[4]对广州蓄能水电厂的地下厂房进行振源测试及整体结构环境激励下的模态测试分析,为结构振动模型修正及结构的安全性能评定提供了依据。随着对抽水蓄能电站振动问题的深入研究,发现大多数学者仅对抽水蓄能电站厂房振动方面进行了研究,而对抽水蓄能电站运作诱发的区域环境振动和噪声问题较少关注^[5-7]。抽水蓄能电站运行水头高,输水管道很长,因此输水管道涉及到的环境区域面积就较大,其运作引起的区域环境振动问题严重影响了居民的正常生活和社会安定^[8-9]。因此,非常有必要分析抽水蓄能电站运作造成的区域环境振动影响和噪声问题。

本文通过 Midas-GTS 建立黑麋峰抽水蓄能电站输水管道区域有限元模型,探讨了在不同工况下抽水蓄能电站运行对输水管道区域环境造成振动和噪音影响规律,并与现场测试数据进行对比分析,提出合理的减振措施,为新建的抽水蓄能电站输水管道运行引起的区域环境振动研究和减振提供参考。

1 工程概况

黑麋峰抽水蓄能电站位于湖南省望城县桥驿镇境内,为 I 等大型工程,见图 1。水库总库容 $1\ 000\times 10^4\text{ m}^3$,有效库容 $843\times 10^4\text{ m}^3$,地下输水发电系统由输水系统及厂房系统组成,共装设 4 台单机容量为 300 MW 的可逆式水泵水轮发电机组,水轮机工况额定水头为 295 m,输水系统采用一洞二机方式布置,上水库工程位于黑麋峰西侧坡,下水库位于杨桥东侧湖溪冲原杨桥电站附近。

根据现场查勘和实测,黑麋峰抽水蓄能电站输水系统运作时,观测人员能感到较为明显的振动,输水系统的运作严重影响了库区居民的正常生活和社会安定。因此,开展黑麋峰抽水蓄能电站输水系统区域环境振动影响分析,并对输水管道的减振提出优化方案和建议,不仅可以解决黑麋峰抽水蓄能电站输水系统区域环境振动问题,还可以为其他抽水蓄能电站的区域环境振动问题

提供解决思路,从而产生良好的社会效益和经济效益。



图 1 黑麋峰抽水蓄能电站

Fig. 1 Heimifeng pumped storage power station

2 输水管道区域环境模型

2.1 基本资料

本文提取黑麋峰抽水蓄能电站区域高程数据,运用 Midas 软件生成地形图,输水管道为混凝土材料,基岩为 II 类花岗岩,整体模型均视为弹性体,不考虑塑性变形。输水管道区域有限元模型坐标系选取如下: x 轴为输水管道轴线,负向指向下游; y 轴为区域长度, z 轴正向为垂直向上。输水管道上游区埋深 25 m 下游区埋深 160 m,内、外半径分别是 5、6 m,两管道中心距 14 m。

根据以上资料建立黑麋峰抽水蓄能电站输水管道区域环境有限元模型。具体材料参数如表 1。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	弹性模量 /MPa	泊松比	容重 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
C25 混凝土	2.8×10^4	0.20	26
II 类花岗岩	4.8×10^4	0.24	28

输水管道区域网格模型和输水管道模型分别如图 2 和图 3 所示,模型网格节点总数达 86 974 个,全部采用三维实体单元。为了研究区域环境振动影响,分别对上游机组区域选值,下游居民区域选值,从而在所选区域进行环境振动监测。输水管道网格划分如图 3 所示。

2.2 边界条件

向岩体远域范围辐射的能量对结构反应相当于阻尼效应,称为“辐射阻尼”。为了能够模拟岩体“辐射阻尼”效应,本文采用人工边界来模拟无限岩体对近场波动的影响^[10-11]。运用 Midas 在主体网格的边界建立人工边界即粘性边界,即在模

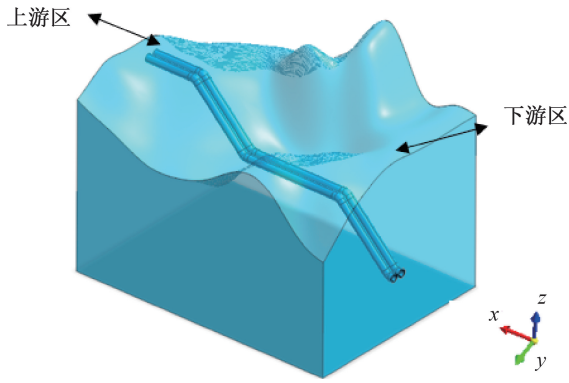


图2 输水管道区域环境模型

Fig. 2 Environmental model of water pipeline area

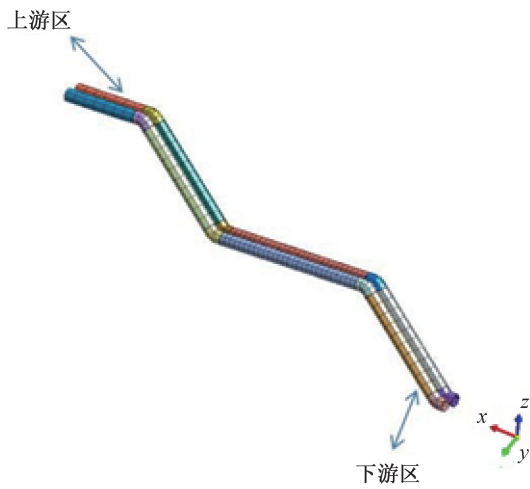


图3 管道有限元网格

Fig. 3 Pipeline finite element mesh

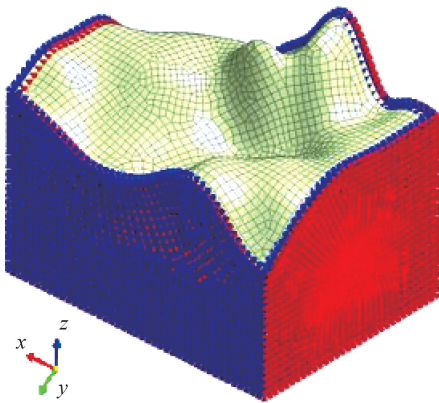


图4 区域环境模型边界约束

Fig. 4 Regional environmental model boundary constraints

型的四周和底部布置弹簧阻尼,如图4。通过在侧向人工边界处附加粘性阻尼器来吸收辐射波能量,从而模拟波在边界处的透射现象。

基于极坐标系下平面波三维运动方程可表示为^[12]

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_s^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中: w 为出平面位移, m ; r 为波源到计算点的距离, m ; c_s 为剪切波波速, m/s :

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

式中: G 为剪切模量, MPa ; ρ 为介质密度, kg/m^3 。

对于从坐标原点射出的柱面波,可以采用如下形式求解:

$$w(r, t) = \frac{1}{\sqrt{r}} f\left(\frac{r}{c_s} - t\right) \quad (3)$$

其中剪应力计算公式为

$$\tau(r, t) = -G \frac{\partial w}{\partial r} \quad (4)$$

联立(3)(4)两式,可以得到介质中任意一点的应力为

$$\tau(r, t) = G \left[\frac{1}{2r\sqrt{r}} f\left(\frac{r}{c_s} - t\right) - \frac{1}{c_s\sqrt{r}} f'\left(\frac{r}{c_s} - t\right) \right] \quad (5)$$

式中: f' 表示 f 对括号内变量的导数。

任意一点的速度可以表示为

$$\frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{r}} f'\left(\frac{r}{c_s} - t\right) \quad (6)$$

将式(3)(5)代入式(6)可以得到应力与速度和位移的关系:

$$\tau(r_b, t) = \frac{G}{2r_b} w(r_b, t) + \rho c_s \frac{\partial w(r_b, t)}{\partial t} \quad (7)$$

其中, r_b 为波源到计算点 b 的距离, m ; c_b 为阻尼器的阻尼系数; k_b 为线性弹簧的刚度系数,可表示为

$$c_b = \rho c_s \quad (8)$$

$$k_b = \frac{G}{2r_b} \quad (9)$$

其中 c_s 为 $2118.29 m/s$, G 为 $28000 MPa$,代入上式中即可得到各部位弹簧阻尼器的参数。

当波沿 z 方向进行传播时,可以假定如下的位移^[13]:

$$u = A_1(x, y) e^{-ik_1(z-v_1t+C_1)} \quad (10)$$

$$v = B_1(x, y) e^{-ik_4(z-v_4t+C_4)} \quad (11)$$

$$w = C_1(x, y) e^{-ik_7(z-v_7t+C_7)} \quad (12)$$

当沿 y 方向进行传播时,可以假定如下的位移:

$$u = A_2(x, z) e^{-ik_2(z-v_2t+C_2)} \quad (13)$$

$$v = B_2(x, z) e^{-ik_5(z-v_5t+C_5)} \quad (14)$$

$$w = C_2(x, z) e^{-ik_8(z-v_8t+C_8)} \quad (15)$$

当沿 x 方向进行传播时,可以假定如下的位移:

$$u = A_3(y, z) e^{-ik_3(z-v_3t+C_3)} \quad (16)$$

$$v = B_3(y, z) e^{-ik_6(z-v_6t+C_6)} \quad (17)$$

$$w = C_3(y, z) e^{-ik_9(z-v_9t+C_9)} \quad (18)$$

式中, u, v, w 分别为 x, y, z 各个方向的位移; $k_1 \sim k_9$ 为不同波的刚度系数; $v_1 \sim v_9$ 为波速; $C_1 \sim C_9$ 为与初始相位有关的值。式(12)(14)和(16)中波的振动方向和传播方向一致,根据波动理论, v_3, v_5, v_7 可以取纵波波速 v_p ; 而式(10)(11)(13)(15)(17)和(18)中波的振动方向和传播方向相垂直,根据波动理论, $v_1, v_2, v_4, v_6, v_8, v_9$ 等取值为横波波速 v_s 。

2.3 模型计算假定

为了模型计算结果的有效性和准确性,根据抽水蓄能电站工程的实际运行情况,提出如下假定:(1)输水管道上游库区进口压力为 0;(2)尾水管内脉动压力根据尾水管测点进行均匀分布;(3)管道环向脉动压力相同。

2.4 计算分析工况

对机组稳定性试验,测试机组的稳定性状态,为机组检修质量评价提供参考^[14],即为工况一,此时,一号尾水管进口压力为 651.83 kPa,频率为 100 Hz;二号尾水管进口压力为 650.38 kPa,频率为 100 Hz。

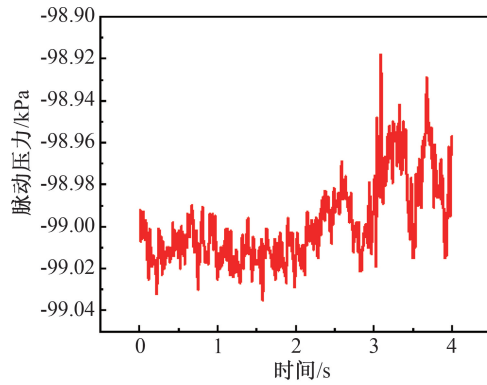
对机组同一流道双机同时甩负荷试验,检验共用输水系统的两台机组同时甩负荷过渡过程性能指标是否满足调节保证计算设计值要求^[15],为工况二,此时,一号尾水管进口压力为 662.96 kPa,频率为 50 Hz;二号尾水管进口压力为 635.91 kPa,频率为 50 Hz。图 5 和图 6 分别为管道脉动压力时程曲线图及脉动时程曲线施加在管道表面具体位置图。

3 输水管道区域振动

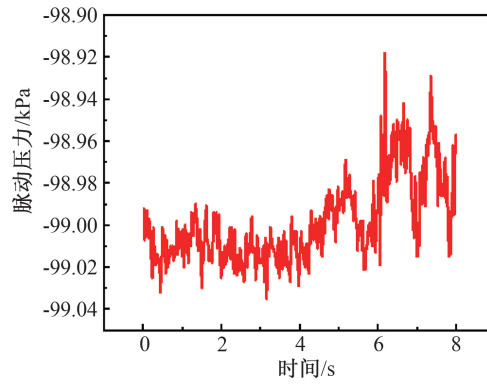
3.1 输水系统区域环境测试

通过现场查勘,选定输水管道上游库区和输水管道下游区居民楼附近开展测试,测试区域应在输水管道上方,见图 7。

输水管道上游库区,在其机组厂房外布置测



(a) 工况一



(b) 工况二

图 5 管道脉动压力时程曲线

Fig. 5 Pipe pulsating pressure time history curve

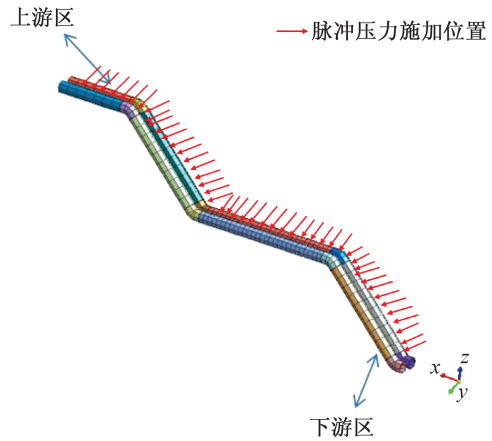


图 6 脉动压力施加位置图

Fig. 6 Location diagram of pulsating pressure application

点,测点测试 3 个方向振动加速度,方向选取为: x 轴平行于厂房外墙, y 轴垂直于厂房外墙, z 轴垂直向上。

下游区居民楼为二层楼,在其室外布置测点,测点测试 3 个方向振动加速度,方向选取为: x 轴平行于楼房外墙, y 轴垂直于楼房外墙, z 轴垂直向上。测试工况为机组稳态运行试验和机组甩负荷运行试验。测试结果见表 2。

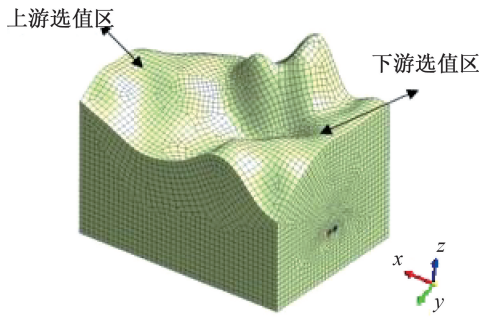


图7 监测点布置示意图

Fig. 7 Diagram of monitoring point layout

3.2 模态分析

运用 Midas 软件计算得到模型模态,输水管道区域环境模型的前三阶模态周期分别为 5.63、4.69 和 4.53 s,验证了模型的合理性和正确性。

3.3 模型参数设定

采用时程分析法可以对结构的振动响应以及各类构件损伤的全过程进行精细的数值模拟^[16-17]。综合考虑模型的规模、计算机的能力和工况荷载的频率特性,在保证结果可靠的前提下,选取的荷载持续时间为 4 和 8 s,时间步长分别

为 0.01 和 0.02 s。此外,参考三峡电站、黑麋峰水电站、仙游水电站、蒲石河电站、深蓄电站等国内类似工程的地基条件,本文地形结构的阻尼比取 0.02。

3.4 模拟结果分析

图 8 和图 9 分别为模拟两种工况下输水管道区域环境振动云图。对两种工况分析可知,区域环境振动中红色区域的振动较为明显,振动值较大的集中区多处于上游区,工况一中区域环境振动的最大加速度为 0.087 6 m/s²,工况二中区域环境振动的最大加速度为 0.064 3 m/s²。

工况一中,输水管道振动集中在管道上游区,其加速度最大值为 0.082 7 m/s²。工况二中,输水管道振动集中在上游管道折弯处,其加速度最大值为 0.030 3 m/s²。

图 10 为不同工况下监测点处加速度时程变化趋势。两种工况下测试点的加速度时程变化趋势相近,上游区区域振动加速度在 z 方向有最大值,约为 0.08 m/s²。下游区区域振动加速度也在 z 方向有最大值,约为 0.04 m/s²。荷载开始阶段会出现较大的变化幅度,逐渐趋于平稳,因上游区输水

表 2 实测上游区和下游区振动加速度峰值(单位:m/s²)

Tab. 2 Measurement of peak vibration acceleration in upstream and downstream areas(unit:m/s²)

工况	上游区			下游区		
	x	y	z	x	y	z
工况一	0.018 3	0.023 6	0.088 7	0.009 2	0.012 3	0.045 7
工况二	0.016 4	0.016 4	0.086 3	0.007 2	0.007 5	0.041 2

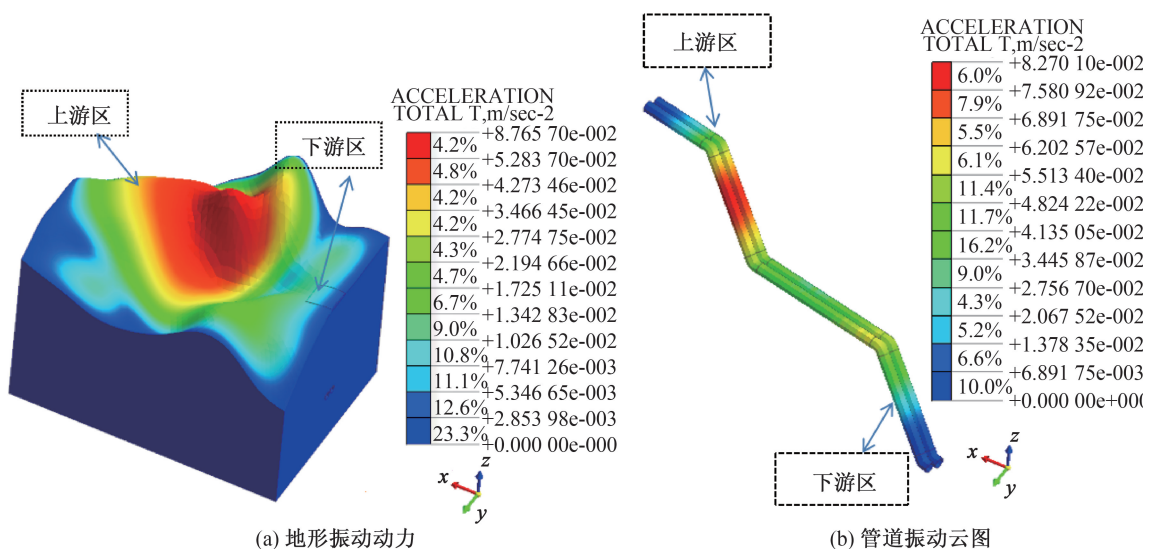


图 8 工况一输水管道区域振动云图

Fig. 8 Vibration cloud image of water pipeline area under working condition 1

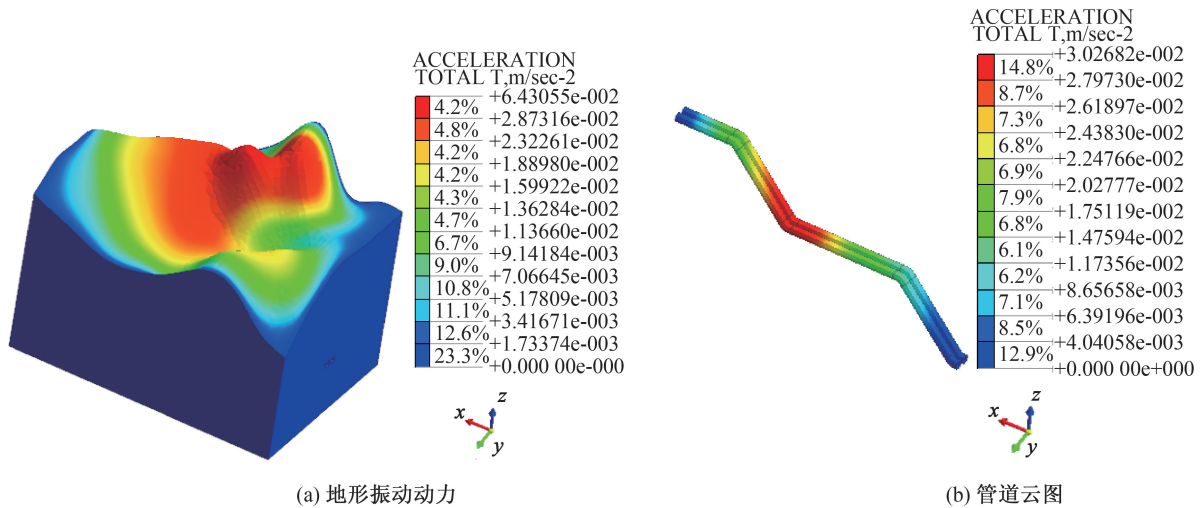


图 9 工况二输水管道区域振动云图

Fig. 9 Vibration cloud image of water pipeline area under working condition 2

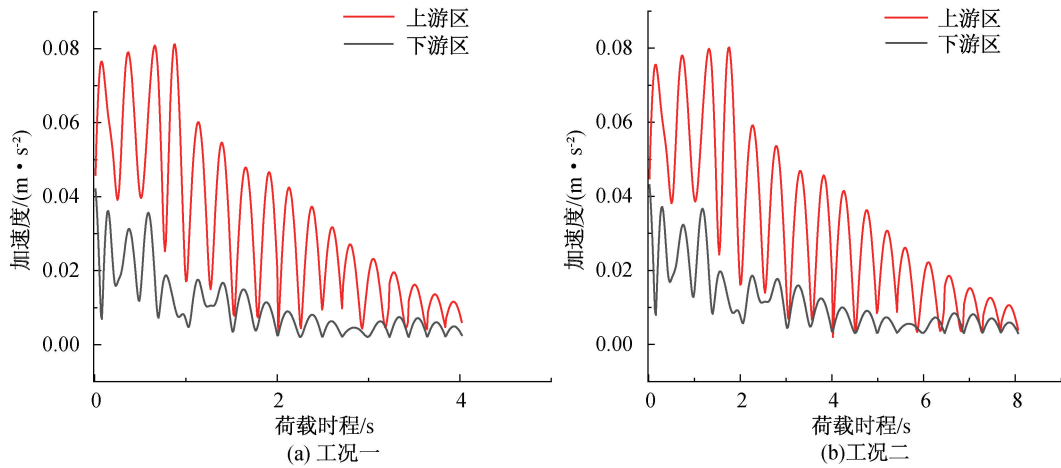


图 10 不同工况下加速度时程变化值

Fig. 10 Acceleration time history variation under different working conditions

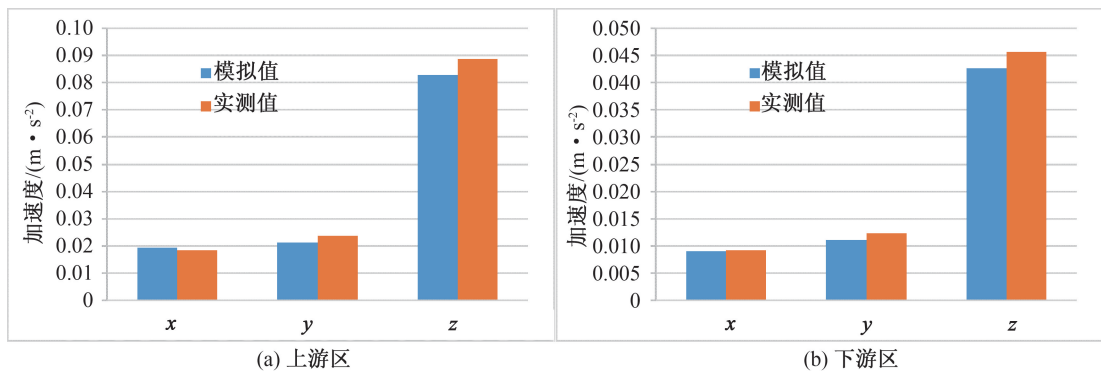


图 11 工况一上游区和下游区振动加速度峰值

Fig. 11 Peak vibration acceleration in upstream and downstream areas under working condition 1

管道中的水位差较大,故上游区的加速度变化值较大。

上下游区域振动各方向的加速度峰值对比分析见图 11 和图 12。上下游区域加速度模拟值与

现场实测结果基本符合,表明本文采用 Midas-GTS 建立的输水管道区域模型的合理性和准确性。由于本次计算模型采用均质花岗岩,因此模拟结果与实测结果存在不可避免的差异。

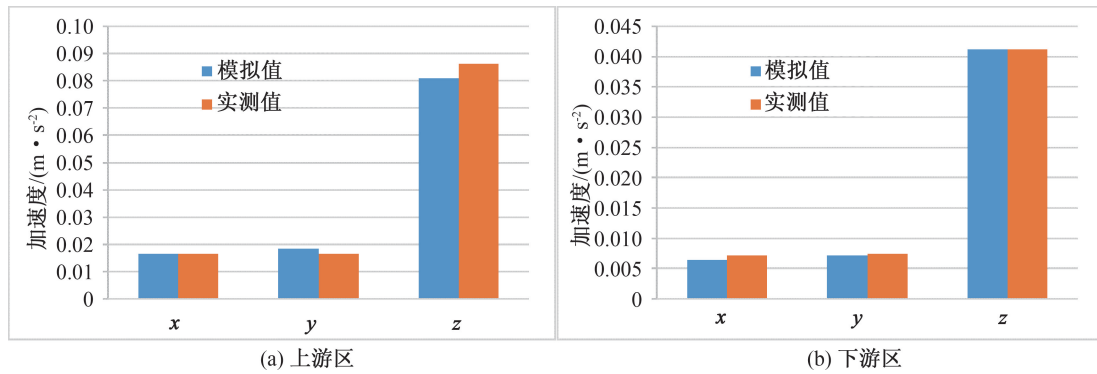


图 12 工况二上游区和下游区振动加速度峰值

Fig. 12 Peak vibration acceleration in upstream and downstream areas under working condition 2

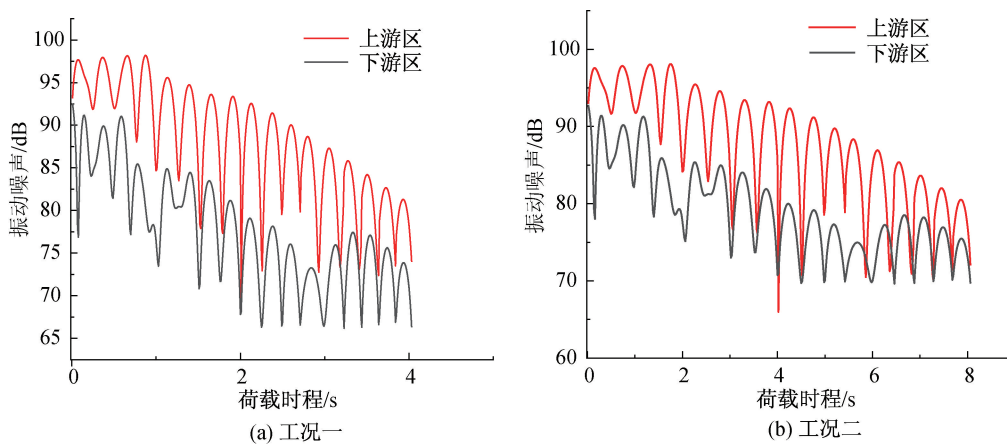


图 13 不同工况下分贝衰减曲线

Fig. 13 Decibel attenuation curve under different working conditions

4 区域环境振动及减振措施

4.1 区域环境振动

城市区域振动响应振动加速度换算公式如下:

$$VAL = 20 \times \lg(a/a_0) \quad (19)$$

式中:VAL 为振动噪声分贝, dB; a 为振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 为基准加速度, 取 $10^{-6} m/s^2$ 。

根据现行《城市区域环境振动标准》可知,居民区夜间振动标准值是 67 dB(相当于 $0.0023 m/s^2$),白天振动标准值是 70 dB(相当于 $0.0032 m/s^2$)^[18]。通过城市区域振动响应振动加速度换算公式得到两种工况分贝衰减曲线如图 13 所示,由于测点选值区位于管道正上方,因此开始振动分贝会较大。通过模拟两种工况可知,环境振动分贝值均大于居民区振动标准值。下游居民区确有明显的振感,且严重影响居民的正常生活,应当采取有效的减振措施。

4.2 减振分析

4.2.1 减振原理

动荷载产生的波在弹性介质中传播,通过地

基把振动传给附近的结构,附近的结构在动荷载作用下会产生严重振动。减小动荷载对结构造成的影响,可以从振动的两个阶段防治,即振动的产生阶段和振动的传播阶段。振动是通过弹性介质向周围及结构传播的,振动幅度的大小与结构材料性能、动荷载频率有很大关联^[19]。本文研究减振措施的侧重点在振动的传播阶段,因输水管道上方居民楼已建成多年,在不影响居民生活的情况下,隔振沟的设置更为方便。开口的隔振沟可以节约材料,但其稳定性和耐久性差,容易坍塌,故隔振沟一般都采用填充沟。本文选用的填充材料为混凝土,其主要参数如表 3。

表 3 填充沟混凝土参数

Tab. 3 Filling trench concrete parameters

材料	弹性模量/MPa	容重 /($kN \cdot m^{-3}$)	泊松比	阻尼比
混凝土	2.8×10^4	24.5	0.2	0.02

隔振沟布置于输水管道上方的居民楼四周,分别在距居民楼 0、5、10、15、20 m 处设置隔振沟,

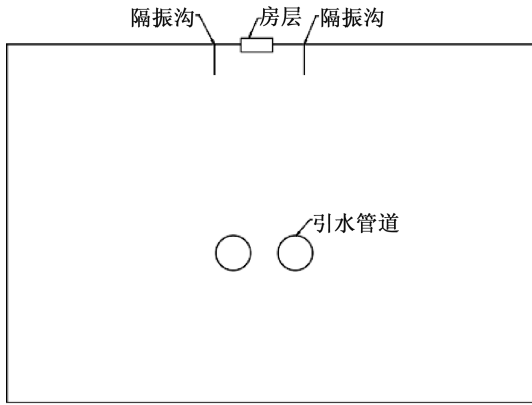


图 14 隔振沟的布置示意图

Fig. 14 Layout diagram of vibration isolation trench

隔振沟长 40 m, 宽 1 m, 深度 4 m, 如图 14 所示。

4. 2. 2 隔振沟减振效果分析

为了减少试验误差, 选择时域曲线中位移幅值的平均值作为该点的竖向位移。分析隔振效果采用振幅衰减比 A_R 进行评价^[20]:

$$A_R = \frac{P_1}{P_2} \quad (20)$$

其中: P_1 为设置隔振措施后某一时刻计算点 R 处的地表位移幅值; P_2 为无隔振时同一时刻、位置相应的响应幅值。

图 15 为采用不同隔振措施时地面最大位移变化规律图。从图 15 可以得出, 设置填充沟时地面位移有明显的减小, 随着填充沟距离的逐渐增大, 地面位移逐渐减小, 填充沟距离超过 17 m 时, 位移急剧下降, 具有明显的隔振效果, 因此, 填充沟最佳位置是在 20 m 处。

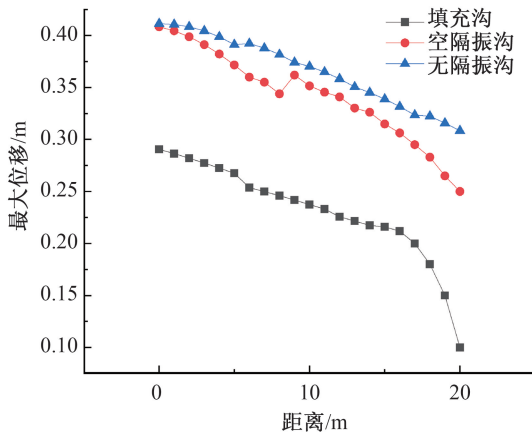


图 15 不同隔振措施下的地面位移变化曲线

Fig. 15 Ground displacement variation curve under different isolation measures

图 16 为空隔振沟和填充沟隔振效果随空间位置变化曲线。空隔振沟时, 其振幅衰减比 A_R 略小

于 1, 而且随着空隔振沟距离的增大, 振幅衰减比变化趋势不大。填充沟的振幅衰减比在 0.7 左右, 随着填充沟距离的增加, 振幅衰减比逐渐减小, 填充沟距离处于 20 m 时, 振幅衰减比急剧减小, 表明在距居民楼大于 20 m 处设置隔振沟具有明显的隔振效果。

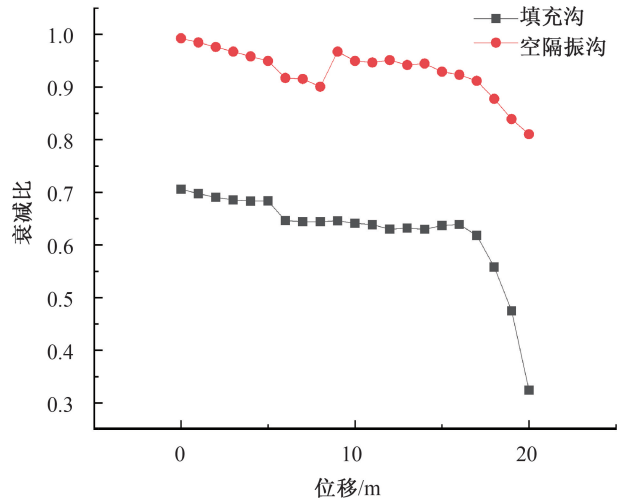


图 16 隔振沟对地面动力响应的隔振效果

Fig. 16 Vibration isolation effect of isolation trench on ground dynamic response

图 17 为无隔振沟、空隔振沟和填充沟不同措施下的分贝衰减曲线。从图 17 可以看出, 设置空隔振沟可以起到降低分贝的效果, 但与无隔振沟所产生的分贝值相差不大, 下降幅度约为 5%, 而填充沟则表现出较为明显的隔振效果, 分贝衰减曲线降低至 30 dB 左右。通过设置填充沟使得区域环境分贝小于城市区域环境振动标准 (70 dB), 满足城市区域环境振动标准和居民日常生活。

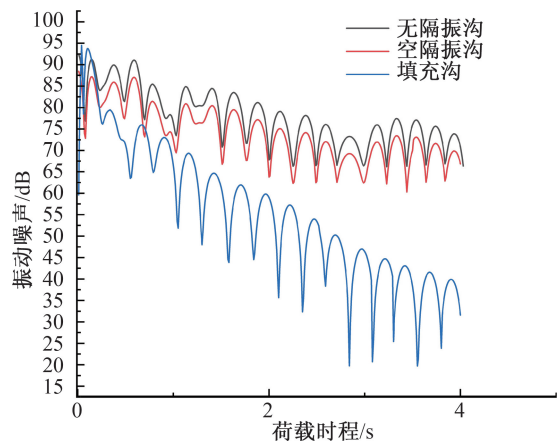


图 17 不同隔振措施下分贝衰减曲线

Fig. 17 Decibel attenuation curve under different vibration isolation measures

5 结论

本文通过对黑麋峰抽水蓄能电站输水系统区域环境振动的运行规律进行系统研究,建立了区域环境振动分析模型,模拟得出区域环境振动加速度和位移时程变化曲线,并与实测数据进行对比验证,最后提出有效的减振措施。得出结论如下:

1)通过对机组稳态和甩负荷两种振动工况的分析可知,输水管道区域的振动会在库区居民建筑里产生一定的振动影响,机组稳态运行时,区域振动影响比较明显。

2)通过设置不同距离的隔振沟,可以有效降低居民楼的振动效果,尤其是含有填充物的隔振沟在距离居民楼20 m处,隔振效果更明显,使得区域环境分贝小于城市区域环境振动标准(70 dB),满足城市区域环境振动标准和居民日常生活。

参考文献:

- [1] 林芳名,陈鹏. 抽水蓄能电站容量配置的优化设计因素与效益分析[J]. 水利技术监督, 2022(5):3.
- [2] PAUL J C, PANIGRAHI B. Performance evaluation of water delivery system of Mahanadi delta irrigation project, Odisha[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 17(1): 46-52.
- [3] 郭建强,许亮华,王少华,等. 大型抽水蓄能电站输水管道区域振动影响监测分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2023,9(4):114-120.
- [4] 徐丽,廖俊,陈建秋,等. 广州抽水蓄能电站A厂振动测试与分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2017,3(4):50-55.
- [5] 向明,杨恒,郑建兴,等. 大型抽水蓄能电站机组与区域环境振动联合测试研究初探[J]. 水力发电, 2021, 47(08):73-77+98.
- [6] 杜林林,兰日清,祖晓臣,等. 区域环境振动对某拟建精密实验室选址的影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(02): 201-206.
- [7] 汪洪军,董玉平,肖永亮,等. 重力加速度计量实验室微振动控制设计[J]. 建筑结构, 2021,51(S2):594-597.
- [8] 丑亚玲,刘文高,乔雄,等. 基于交通振动环境下建筑结构损伤机理及减振隔振的研究现状[J]. 地震工程学报, 2021, 43(03): 654-662+686.
- [9] YAO J, ZHAO R, ZHANG N, et al. Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125:105741.
- [10] 吴翔,丁海平. 基于粘弹性边界的三维土体地震响应分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2023, 36(04): 1-7.
- [11] 卢瑜. 新时期农村饮用水输水管道设计分析[J]. 水利规划与设计, 2019(5):3.
- [12] 雒向东,余亮,李永宁. 平面波在异向介质界面反射与折射条件研究[J]. 宁夏师范学院学报, 2023, 44(07):17-23.
- [13] 严细水. 弹性地基中三维动力问题的耦合粘性边界[J]. 岩土工程学报, 2006(08):937-939.
- [14] YANG J, PAVESI G, YUAN S, et al. Experimental characterization of a pump-turbine in pump mode at hump instability region[J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(5):051109.
- [15] 王晶,陈胜,李向菊,等. 大水头变幅长引水系统水电站甩负荷导叶三段关闭规律[J]. 水电能源科学, 2022,40(05):160-163+168.
- [16] NICOLET C, ALLIGNE S, BERGANT A, et al. Parametric study of water column separation in Francis pump-turbine draft tube[J]. La Houille Blanche, 2012(3): 44-50.
- [17] 王亚勇. 结构时程分析输入地震动准则和输出结果解读[J]. 建筑结构, 2017, 47(11):6.
- [18] 李伟科,林治平,黄俊光,等. 地铁邻近超高层建筑振动响应及减振降噪研究[J/OL]. 建筑结构, 1-7[2024-03-01]. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20221296>.
- [19] 袁万,蔡袁强,史吏,等. 基于三维有限元饱和土地基中空沟隔振性能研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7):8.
- [20] 李广洲,刘万义,包霞. 高烈度区某天然气工程指挥部隔震加固设计与施工[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(03): 34-39.

(责任编辑 王利君)