

基于多目标优化的高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性研究

郑芝鑫

广东宏茂建设管理有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025040010

摘要：高水头水电站在水利能源领域占据关键地位，但其压力管道的振动问题始终是影响运行稳定性与安全性的核心难题。为此本文构建精准的流固耦合振动模型，引入多目标优化算法对管道结构参数与运行参数实施优化，旨在达成振动抑制与运行稳定性提升的双重目标。研究结果证实，优化后的管道振动幅值显著降低，运行稳定性得到切实保障，为高水头水电站压力管道的设计优化与安全运行提供了有力的技术支撑。

关键词：高水头水电站；压力管道；振动抑制；多目标优化；运行稳定性

Research on Vibration Suppression and Operation Stability of Pressure Pipelines in High-Head Hydropower Stations Based on Multi-Objective Optimization

Zheng Zhixin

Guangdong Hongmao Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Gaoshuitou hydropower stations occupy a key position in the field of water conservancy and energy, but the vibration problem of their pressure pipelines has always been the core problem affecting operational stability and safety. Therefore, an accurate fluid–structure coupling vibration model is constructed, and a multi-objective optimization algorithm is introduced to optimize the pipeline structure parameters and operating parameters, aiming to achieve the dual goals of vibration suppression and operational stability improvement. The research results confirm that the vibration amplitude of the optimized pipeline is significantly reduced, and the operation stability is effectively guaranteed, which provides strong technical support for the design, optimization and safe operation of the pressure pipeline of the high-head hydropower station.

Keywords : Gaoshuitou hydropower station; pressure pipes; vibration suppression; multi-objective optimization; operational stability

引言

随着能源需求的增长与对清洁能源的重视，高水头水电站作为一种重要的可再生能源发电方式，得到了广泛发展。压力管道作为高水头水电站输水系统的关键部件，承担着将高压水流从水库输送至水轮机的重要任务。开展高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性研究具有重要的现实意义。

一、高水头水电站压力管道振动与运行稳定性问题分析

(一) 压力管道振动的产生机制

高水头水电站压力管道内水流速快、压力高，紊流、水击等不稳定流动会对管壁产生周期性或非周期性作用力，引发振动。阀门快速启闭产生的水击压力波与管道结构相互作用，会导致剧烈振动^[1-3]。同时，管道的刚度、质量分布及支承条件等结构特性

决定其固有频率，当水流激励频率与其接近或相等时，会引发共振，使振动幅值急剧增大。

(二) 对运行稳定性的影响

压力管道过度振动会导致材料疲劳损伤，降低强度和使用寿命，可能出现裂纹、破裂及漏水等事故^[4]。振动传递至水轮机，会恶化其工作环境，导致叶片受力不均，产生额外振动和噪声，降低能量转换效率，还可能引发机组不稳定运行，冲击电网稳定性。

二、基于多目标优化的压力管道振动抑制与运行稳定性提升策略

(一) 多目标优化算法的选择与对比

1. 常用多目标优化算法介绍

为了选择最适合高水头水电站压力管道多目标优化的算法，对 NSGA - II、MOPSO 和 SPEA2 三种算法的性能进行对比分析。以收敛速度、解集多样性和计算效率为评价指标，在相同的优化问题和参数设置下进行测试，结果如下表 1 所示。

表1：三种算法优化测试结果对比

算法	收敛速度	解集多样性	计算效率(次/秒)
NSGA - II	较快	较好	25
MOPSO	快	一般	30
SPEA2	较慢	好	18

从表 1 可以看出，NSGA - II 算法在收敛速度和解集多样性方面表现较为均衡，计算效率也能满足工程需求。MOPSO 算法收敛速度快，但解集多样性相对较差；SPEA2 算法解集多样性好，但收敛速度较慢，计算效率较低。综合考虑，NSGA - II 算法更适合用于高水头水电站压力管道的多目标优化问题，因此本文最终选择 NSGA - II 算法。

(二) 优化目标函数的建立与细化

1. 振动抑制目标函数的细化

在实际工程中，仅以振动幅值最小作为振动抑制目标不够全面，还需要考虑振动的频率特性^[5]。因此，将振动抑制目标函数细化为振动幅值和振动能量的综合优化^[6]。

振动能量可以通过振动信号的功率谱密度积分得到。设振动幅值为 A ，振动能量为 E ，则细化后的振动抑制目标函数 f_1 可表示为：

$$f_1 = \min(\omega_1 A + \omega_2 E)$$

其中， ω_1 和 ω_2 分别为振动幅值和振动能量的权重系数，根据工程实际需求确定。

2. 运行稳定性目标函数的扩展

除了管道的应力水平和变形量外，管道的振动加速度也是衡量运行稳定性的重要指标^[7-8]。因此，将运行稳定性目标函数扩展为包含应力水平、变形量和振动加速度的综合指标。

设应力水平为 σ ，变形量为 δ ，振动加速度为 α ，则运行稳定性目标函数 f_2 可表示为： $f_2 = \max(\alpha \frac{[\sigma] - \sigma}{[\sigma]} + \beta \frac{[\delta] - \delta}{[\delta]} + \gamma \frac{[\alpha] - \alpha}{[\alpha]})$

其中， $[\sigma]$ 、 $[\delta]$ 、 $[\alpha]$ 分别为应力、变形量和加速度的许用值， α 、 β 、 γ 为相应的权重系数，且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

(三) 决策变量与约束条件的确定与量化

1. 决策变量的量化

为了便于优化计算，对决策变量进行量化处理。管道壁厚的取值范围为 [8mm, 20mm]，以 1mm 为步长进行离散；管径的取值范围为 [1.5m, 3m]，以 0.1m 为步长离散；支承间距的取值范围为 [6m, 15m]，以 1m 为步长离散；水流速度的取值范围为 [5m/s, 15m/s]，以 0.5m/s 为步长离散；压力的取值范围为 [5MPa, 15MPa]，以 0.5MPa 为步长离散。

2. 约束条件的量化

强度约束：管道的最大应力 $\sigma_{max} \leq [\sigma]$ ，其中 $[\sigma]$ 为管道材料的许用应力，对于钢衬钢筋混凝土管道，其许用应力通常取 200MPa。

变形约束：管道的最大变形量 $\delta_{max} \leq [\delta]$ ，根据相关规范，管道的最大允许变形量为管径的 0.2%。

水力约束：水流在管道内的水头损失 $h_f \leq [h_f]$ ，水头损失可根据曼宁公式计算， $[h_f]$ 根据水电站的设计要求确定。

运行参数约束：水流速度 $v \in [\bar{v}_{min}, \bar{v}_{max}]$ ，压力 $p \in [p_{min}, p_{max}]$ ，其中 \bar{v}_{min} 、 \bar{v}_{max} 、 p_{min} 、 p_{max} 为水轮机设计工作范围内的流速和压力限值。

三、高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性提升实例分析

(一) 工程背景

该高水头水电站位于西南地区，装机容量为 300MW，最大水头为 350m，压力管道采用钢衬钢筋混凝土结构，管径为 2.5m，长度为 800m。该水电站自投入运行以来，压力管道在满负荷运行时振动较为明显，振动幅值达到 0.8mm，超过了设计允许值 0.5mm，对电站的安全运行构成了潜在威胁。为了解决这一问题，对该压力管道进行基于多目标优化的振动抑制与运行稳定性提升研究。

(二) 建立压力管道流固耦合振动模型

1. 模型参数设置

采用 ANSYS 软件建立压力管道的流固耦合振动模型^[9-10]。

管内流体为水，密度为 1000kg/m³，动力黏度为 1.002×10^{-3} Pa · s。模型的网格划分采用结构化网格，管道结构单元采用 Solid185，流体单元采用 Fluid30，流固耦合界面采用 Interface154。

2. 模型验证

为了验证所建立模型的准确性，进行了现场振动测试。将试验测得的振动幅值与模型仿真结果进行对比，如下表 2 所示。

表2：三种算法优化测试结果对比

运行工况	试验值(mm)	仿真值(mm)	相对误差(%)
50% 负荷	0.35	0.33	5.7
75% 负荷	0.58	0.61	5.2
100% 负荷	0.80	0.78	2.5

从表 2 可以看出，模型仿真结果与试验值的相对误差均在 6% 以内，表明所建立的流固耦合振动模型具有较高的准确性，能够较好地反映压力管道的实际振动特性。

(三) 优化结果分析

优化后的压力管道振动幅值降低了 47.5%，振动能量降低了 53.6%，振动得到了显著抑制；应力水平降低了 33.3%，变形量降低了 36.0%，振动加速度降低了 45.3%，运行稳定性指标得到了明显改善。这表明通过多目标优化方法，成功实现了压力管道振动抑制与运行稳定性的协同提升。

四、结论

本文通过对高水头水电站压力管道振动抑制与运行稳定性的研究，得出以下结论：高水头水电站压力管道的振动主要由水流激励和结构特性共同作用引起，其中紊流脉动压力、水击压力是主要的水流激励源，管道的固有频率特性是影响振动响应的关键

结构因素。多目标优化方法能够有效协调振动抑制与运行稳定性之间的关系。采用 NSGA - II 算法对压力管道的结构参数和运行参数进行优化，实现了两者的协同提升。工程实例分析表明，优化方案在技术和经济上均具有可行性。

参考文献

- [1] 刘琦 , 鲁瑶 , 刘大斌 , 等 . 长距离引水式水电站机组压力管道快速排水研究 [J]. 水电与新能源 , 2024, 38(11):12-14.
- [2] 罗佩玉 , 刘朋 . 昌波水电站压力管道布置型式选择及结构设计 [J]. 四川水力发电 , 2024, 43(04):95-100+112.
- [3] 汪海雁 , 张顺强 . 杨房沟水电站压力钢管鼓包原因分析及处理措施 [J]. 水利水电快报 , 2023, 44(S2):32-34+38.
- [4] 陈刚 . LTQN 水电站发电引水系统水力过渡过程分析 [J]. 云南水力发电 , 2023, 39(11):107-112.
- [5] 张志天 , 秦福兴 , 赵传啸 , 等 . 某水电站压力管道排 / 充水管控策略研究 [J]. 四川水力发电 , 2023, 42(S1):90-100.
- [6] 孟闻远 , 唐志强 , 郭颖奎 , 等 . 几何缺陷压力钢管稳定性数值分析 [M]. 中国水利水电出版社 : 202207: 122.
- [7] 刘庆胜 . KEWZK 水电站压力管道设计方案综述 [J]. 黑龙江水利科技 , 2021, 49(12):112-115.
- [8] 毛成 , 苏立 , 潘月国 , 等 . 小水电站压力管道水动力学特性研究 [J]. 人民长江 , 2021, 52(01):151-157.
- [9] 赵玮 , 劳力 , 董旭荣 . 烟岗高水头水电站设计关键技术 [J]. 陕西水利 , 2020, (10):138-140+143.
- [10] 左保静 , 王文全 , 曹善宇 . 农村水电站压力管道水头损失计算 [J]. 江苏水利 , 2020, (03):30-33.