

DOI:

抽水蓄能电站输水发电系统水力振动特性研究

朱孟君¹, 段智军¹, 毛玉铜², 周建旭², 王锋¹, 马佳¹, 魏洪伟¹

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:【目的】抽水蓄能电站工况变换频繁, 输水发电系统内部流态呈紊乱复杂状态, 易诱发系统不稳定振荡, 开展系统的水力振动特性研究旨在明晰系统的频率特性以及阵型特性, 为保障电站安全稳定运行提供依据。【方法】基于水力振动理论, 采用传递矩阵法建立双机共引水和尾水管路并设置尾水调压室系统的水力振动分析模型; 通过自由振动分析, 求解系统各阶自由振动复频率和振型, 并针对性地开展振动特性分析, 由此评估系统的稳定性。【结果】①系统在发电和抽水工况, 所有自由振动衰减因子皆为 $-0.359\ 5 \sim -0.004\ 5$, 各阶自由振动呈衰减特性, 系统稳定性良好且无自激振动风险; ②系统各阶自由振动频率主要由系统的布置形式和管道参数决定, 与运行工况无关, 工况变化只影响衰减因子的大小; 前三阶自由振动频率分别与尾水调压室、引水事故闸门井和尾水检修闸门井水位波动周期相对应, 高阶自由振动频率由水体弹性主导, 且受管道波速影响产生偏移, 偏移量随阶数升高而增大; ③发电方向的第6阶、第11阶和抽水方向的第6阶、第7阶、第10阶的压力振荡幅值较大, 分别为 7.638、8.134 和 16.510、18.300、30.671 m, 需重点控制相关频率扰动。④相同幅值扰动作用下, 抽水方向的压力振荡幅值明显大于发电方向, 应特别注意抽水运行时的安全问题。【结论】抽水蓄能电站水力振动特性研究揭示了输水发电系统的频域特性及阵型特征, 据此可分析系统稳定性并提示危险频率振源, 为电站安全稳定运行提供技术支持。

关键词: 抽水蓄能电站; 双机共引水和尾水管路; 水力振动; 传递矩阵法; 稳定性分析

中图分类号: TV743

文献标志码: A

文章编号:

在“双碳”目标背景下, 为构建以新能源为主体的新型电网系统, 风、光等间歇式能源大规模并入电网, 使电力系统的稳定运行面临重大挑战, 抽水蓄能电站的建设也迎来了快速增长的高峰期^[1-2]。在新型电网系统中, 任岩等^[3]采集了抽蓄电站附近风光资源数据, 通过对出力特性的分析, 证实了抽水蓄能电站是光伏发电的良好补充资源。针对新型电网系统中不同能源的组合运行, 莫巨华等^[4]提出了一种基于卧式抽蓄的风光水储联合运行优化调度方法, 提高了能源利用率, 增强了系统消纳清洁能源的能力; LI J X 等^[5]基于 NSGA-II 算法, 提出了一种混合能源发电系统的多目标优化分配方法, 提高了多能源电网系统的运行效率。相较于常规电站, 抽水蓄能电站因其具有水头高、工况切换频繁、

双向流动等特点, 其实际运行中的过渡过程与控制逻辑更为复杂^[6-7]。针对这一问题, 胡昊等^[8]提出了一种基于大语言模型的抽水蓄能电站智能运维辅助系统, 提高了运维人员的业务水平和运维效率。然而机组若长期运行于非额定工况下, 极易造成内部流态紊乱, 出现分离涡、叶道涡、旋转失速、回流、无叶区环流等一系列不稳定流态, 进而诱发管道压力的剧烈振荡^[9-11], 由此引起的抽水蓄能电站的安全稳定运行一直备受关注。

抽水蓄能电站运行稳定性分析一般可以通过特征线法(Method Of Characteristics, MOC)或状态方程积分的方法在时域内求解, 或者通过短时傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、状态空间法或水力振动理论在频域内进行振动模态分析^[12-14]。

收稿日期/Received: 2025-09-16

修回日期/Revised: 2025-12-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52339006); 中国铁建股份有限公司科研计划项目(2023-B14)

第一作者: 朱孟君(1972—), 男, 正高级工程师, 从事水利水电工程方面的研究。E-mail: tsyzmj@163.com。

通信作者: 毛玉铜(1995—), 男, 博士研究生, 从事水利水电工程方面的研究。E-mail: 18700909161@163.com。

基于特征线法的时域计算方法可以直接得到各变量的时间历程线, 分析各种控制模式下的升速时间、超调量、衰减度、振荡次数等特征参数^[15], 直观评价过渡过程的优劣, 同时经众多工程项目的检验, 其实用性得到证实。使用状态空间法与水力振动理论的水电站稳定性频域分析方法, 在工程实践中的应用虽不及特征线法, 但相关研究成果却颇为丰硕。基于状态空间法, YU X D 等^[16]提出用图论方法推导复杂布置形式电站状态方程的系数矩阵, 通过特征值分析法确定了系统的稳定区域; LI G H 等^[17]建立了水轮机调速系统与引水系统耦合的稳定分析模型, 揭示了水轮机、调速器和水体惯性相互作用对系统稳定性的影响。CHEN Y Z 等^[18]建立了变转速抽水蓄能电站的水机电耦合振荡模型, 研究了电力系统影响下的低频振荡和次同步振荡; SHAHGHOLIAN G^[19]构建了分析低水头轴流式水轮机稳定性的状态方程, 分析了参数变化对阻尼负荷角和转速振荡的影响。CHEN S 等^[20]基于状态方程, 进行拉氏变换得到系统的传递函数, 通过求解特征方程并进行反拉氏变换得到各变量时域变化的解析表达式。基于水力振动理论, 朱渊岳等^[21]、叶复萌等^[22]利用水力阻抗法和特征线法对试验数据进行了数值模拟, 研究了抽水蓄能电站由于球阀密封问题导致的管系振动事故; ZHOU J X 等^[23]应用非线性振动理论, 分析了抽水蓄能电站因机组的

不稳定区域引起的自激振动特性; 刘紫蕊等^[24]采用传递矩阵法对抽水蓄能电站可能发生的水力振荡进行了研究, 分析了各种可能引起水力共振的振源; ZHENG Y 等^[25]使用整体矩阵法分析了尾水系统包含明渠流水电站的运行稳定性。

上述使用状态方程的特征分析法可以很直观的得到电站输水发电系统的特征频率, 并依据特征值实部的正负来判断系统的稳定性。但由于使用的是有压管道水体的刚性模型, 不能考虑水体弹性对系统稳定性的影响。基于水力振动理论的频域研究侧重于由球阀、可逆式机组、尾水波动等单一因素所引起的输水发电系统响应特性分析, 缺少对输水发电系统整体稳定性的分析判断。本文基于水力振动理论, 计算抽水蓄能电站输水发电系统的各阶自由振荡频率。通过复频率实部(衰减因子)判定系统的水力稳定性, 并结合虚部(固有频率)及阵型分析系统共振风险, 旨在从频域角度整体评估系统的稳定特性, 为抽水蓄能电站的安全稳定运行提供参考。

1 数学模型

1.1 双机共引水和尾水管路系统说明

图 1 为某抽水蓄能电站的布置图, 双机共用一条引水和尾水管路, 下游岔点后方设置阻抗式调压室, 同时设置有引水事故闸门井和尾水检修闸门井。

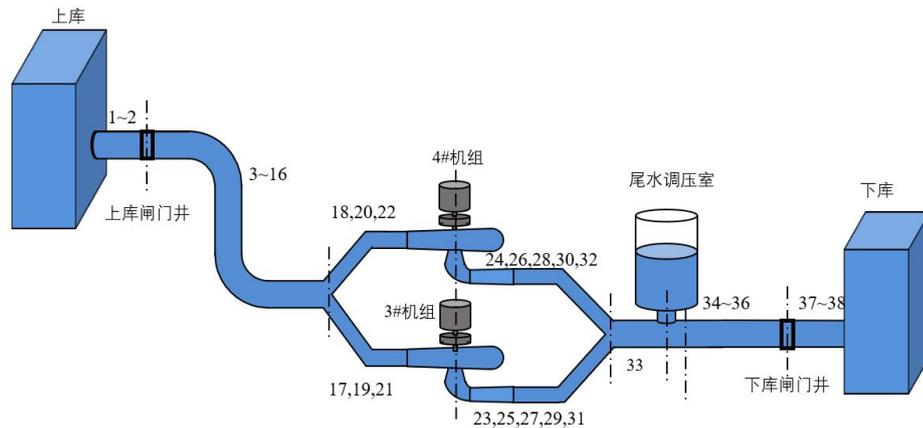


图 1 双机共引水和尾水管路系统布置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Layout of the Water Diversion and Tailrace Pipeline System for Two Turbines Sharing the Same Pipeline

1.2 水力振动特性分析的数学模型^[26]

1.2.1 单一特性管道

结合图 2 所示的单一特性的计算管段, 基于水力振动理论的场传递矩阵如式(1)所示:

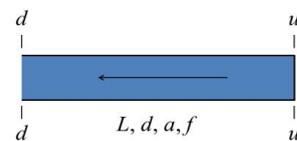


图 2 单一特性管段

Fig. 2 Pipe with Single Characteristic

$$\begin{Bmatrix} H_d \\ Q_d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & -Z_c \sinh \gamma l \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_u \\ Q_u \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中： γ 、 l 、 Z_c 分别为管道的传播常数、长度和特征阻抗； H_u 、 H_d 和 Q_u 、 Q_d 分别为管道进出口断面的振荡水头和振荡流量。

1.2.2 水泵水轮机组

考虑图3所示的水泵水轮机流量特性曲线，经过推导得到的水泵水轮机水力阻抗如式(2)所示：

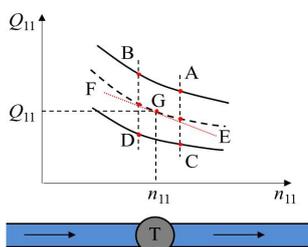


图3 水泵水轮机流量特性曲线
Fig. 3 Discharge characteristic curves of pump-turbines

$$Z_T = \frac{H_t}{Q_t} = \frac{2n}{n_{11} D_1 (Q_{11} - \frac{\partial Q_{11}}{\partial n_{11}} n_{11})} \quad (2)$$

式中： Q_{11} 为单位流量； n_{11} 为单位转速； n 为机组转速； D_1 为机组转轮直径； H_t 和 Q_t 分别为机组运行水头和流量的振荡值。

其相应的点传递矩阵为：

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & \pm Z_{PT} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $Z_{PT} = \frac{H_{PT}}{Q_{PT}}$ ， Q_{PT} 、 H_{PT} 、 Z_{PT} 分别定义为

水轮机或水泵的引用流量振荡值、工作水头(扬程)振荡值和水力阻抗；符号“+”表示可逆式机组的水泵工况，符号“-”表示可逆式机组的水轮机工况。

1.2.3 阻抗式调压室

考虑图4所示的阻抗式调压室，计及调压室底部孔口阻抗和调压室内部水流惯性，推导得到阻抗式调压室的水力阻抗如式(4)所示：

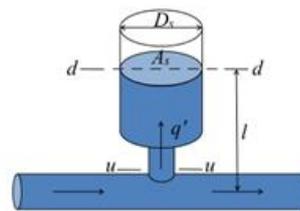


图4 阻抗式调压室
Fig. 4 Throttled surge tank

$$Z_u = \frac{H_u}{Q} = \frac{sl}{gA_s} + \frac{1}{sA_s} + 2k\bar{Q}_s \quad (4)$$

式中： Z_u 为调压室阻抗孔进口断面的水力阻抗；

$k = \frac{1}{2g\varphi^2 S^2}$ 为流进或流出调压室阻抗孔的水头

损失系数，其中 φ 为阻抗孔的流量系数(一般流入大井取0.6，流出大井取0.8)； \bar{Q}_s 为进出调压室的稳定流量； S 为阻抗孔的面积； A_s 为调压室的面积； l 为调压室内水位高度。

其点传递矩阵为：

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \pm \frac{1}{Z_u} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2.4 并联系统

图5所示的并联系统由 n 条支路组成，各支路上、下游两个并联点分别并入支路 k_1 、 k_2 ，定义第 i 条并联管路的场传递矩阵如式(6)所示：

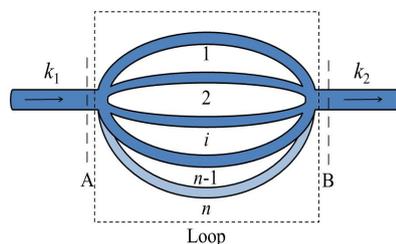


图5 并联系统
Fig. 5 Parallel system

$$[F]_i = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix}_i \quad (6)$$

则该并联系统的场传递矩阵为^[4]：

$$[F] = [P]_B [P]_{loop} [P]_A = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$u_{11} = \frac{\zeta}{\eta}, \quad u_{12} = \frac{1}{\eta}, \quad u_{21} = \frac{\zeta\xi}{\eta} - \eta, \quad u_{22} = \frac{\xi}{\eta}。$$

$$\eta = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_{12}} \right)_i, \quad \zeta = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_{11}}{u_{12}} \right)_i + \frac{1}{Z_{dk1}},$$

$$\xi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} \right)_i + \frac{1}{Z_{dk2}}。$$

1.2.5 输水发电系统总传递矩阵及特征方程

水电站输水发电系统上游和下游断面的振荡水头 H_U 、 H_D 和振荡流量 Q_U 、 Q_D 满足以下关系:

$$\begin{Bmatrix} H_D \\ Q_D \end{Bmatrix} = U \begin{Bmatrix} H_U \\ Q_U \end{Bmatrix} \quad (8)$$

按照输水发电系统布置形式, 采用传递矩阵法得到的系统总传递矩阵 U 可按式(8)计算:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} = [F]_{31} [F]_{30} [P]_{wz} \quad (9)$$

$$[F]_i [P]_{st} [F]_{24} [F]_{loop} [F]_j [P]_{yz} [F]_2 [F]_1$$

式中: $[F]_i$ ($i=29,28,27,26,25$)、 $[F]_j$ ($j=7,6,5,4,3$)

为各管段的场传递矩阵; $[P]_{wz}$ 为尾水隧洞检修闸门井点传递矩阵; $[P]_{st}$ 为尾水调压室的点传递矩

阵; $[F]_{loop}$ 为包括机组节点及分岔点的环路场传递矩阵, 由两个支路的总传递矩阵及分岔点的阻抗特性求解得到; $[P]_{yz}$ 为引水事故闸门节点的点传递矩阵。

把式(9)代入式(8)并写成代数形式可得:

$$\begin{cases} H_D = u_{11}H_U + u_{12}Q_U \\ Q_D = u_{21}H_U + u_{22}Q_U \end{cases} \quad (10)$$

因上游进口端和下游出口端均为水库, 其振荡水头为零, 即 $H_D = 0, H_U = 0$, 则进出口断面水力阻抗 Z_U 、 Z_D 均为零^[15], 故由式(10)可得系统的特征方程为:

$$Z_D(s) = \frac{u_{12}}{u_{22}} = 0 \quad (11)$$

即

$$u_{12} = 0 \quad (12)$$

以上即为双机共引水和尾水管路系统的水力振动特性分析模型, 通过求解以上特征方程即可得到系统的水力振动特性。

2 抽水蓄能系统实例

针对图 1 所示的抽水蓄能电站布置形式, 各管道数据见表 1, 各闸门井和尾水调压室的参数见表 2, 机组特性参数见表 3。

表 1 某抽水蓄能电站输水发电系统管道参数

Tab. 1 Pipeline parameters of the water conveyance and power generation system of a pumped storage power station

管段编号	长度/m	当量管径/m	糙率	管段编号	长度/m	当量管径/m	糙率
1	115.270	9.206	0.014	17	30.000	2.997	0.014
2	175.308	6.968	0.012	18	19.500	2.800	0.012
3	104.050	6.240	0.012	19	12.234	2.624	0.012
4	46.5238	6.200	0.012	20	16.700	3.894	0.012
5	249.365	6.191	0.012	21	93.470	6.200	0.012
6	46.523	5.800	0.012	22	35.799	6.200	0.014
7	155.200	5.800	0.012	23	47.270	6.436	0.014
8	41.175	4.000	0.012	24	40.000	8.400	0.014
9	30.000	2.997	0.012	25	366.340	8.400	0.014

管段编号	长度/m	当量管径/m	糙率	管段编号	长度/m	当量管径/m	糙率
10	19.500	2.800	0.012	26	41.487	8.400	0.014
11	12.234	2.606	0.012	27	21.390	8.400	0.014
12	16.700	3.894	0.012	28	41.887	8.400	0.014
13	93.474	6.200	0.012	29	54.000	8.110	0.014
14	38.347	6.200	0.014	30	18.500	7.630	0.014
15	28.000	7.593	0.014	31	71.000	9.553	0.014
16	32.171	4.000	0.014				

表2 闸门井、调压室参数

Tab. 2 Parameters of Gate Shafts and Surge Chambers

名称	项目	数值
引水事故闸门井	阻抗孔面积/m ²	16.56
	井腔面积/m ²	51.11
尾水检修闸门井	阻抗孔面积/m ²	16.55
	井腔面积/m ²	42.62
尾水调压室	连接管长度/m	71.3
	连接管直径/m	5
	大井直径/m	15

表3 抽水蓄能电站机组参数

Tab. 3 Parameters of the pump-turbine

名称	数值	水轮机工况		水泵工况	
		名称	数值	名称	数值
转轮直径 D_1 /m	4.81	额定水头/m	326	最小扬程流量/(m ³ /s)	93.1
转轮直径 D_2 /m	2.8	额定流量/(m ³ /s)	105.8	最小扬程效率/%	91
额定转速 n_r /(r/min)	333.3	额定出力/MW	306	水泵最大入力/MW	314
机组转动惯量 GD^2 /(kg·m ²)	9*10 ⁶	额定效率/%	90.5		

3 系统水力振动特性分析

3.1 输水发电系统自由振动特性分析

考虑图1所示输水发电系统在额定发电工况(上游正常蓄水位,同一水力单元两台机组在额定水头、额定功率下运行; $H_u=628$ m, $H_d=285.8$ m)和最小扬程抽水工况(上游正常蓄水位,下游死水

位,同一水力单元两台机组在最小扬程下抽水运行; $H_u=287$ m, $H_d=598$ m)运行时开展系统的自由振动计算,以分析系统的频域特征以及运行稳定性。根据式(12),计算分析得到该抽水蓄能电站输水发电系统额定工况运行时水力-机械系统的复频率(自由振动频率和衰减因子),结果见表4。

表4 输水发电系统自由振动频率和衰减因子

Tab. 4 The free vibration frequencies and damping factors of the water conveyance and power generation system

阶型 k	Case1: 额定发电工况复频率		Case2: 最小扬程抽水复频率	
	衰减因子 σ	自由振动频率 ω /(rad/s)	衰减因子 σ	自由振动频率 ω /(rad/s)
1	-0.005 4	0.069 1	-0.005 3	0.069 2
2	-0.006 9	0.149 6	-0.007 7	0.154 9
3	-0.005 0	0.341 1	-0.004 5	0.335 8
4	-0.347 2	3.654 1	-0.236 5	3.725 6

阶型 k	Case1: 额定发电工况复频率		Case2: 最小扬程抽水复频率	
	衰减因子 σ	自由振动频率 ω /(rad/s)	衰减因子 σ	自由振动频率 ω /(rad/s)
5	-0.029 2	5.252 0	-0.022 8	5.242 1
6	-0.017 8	6.946 4	-0.023 2	6.996 6
7	-0.359 5	8.811 3	-0.260 3	8.968 5
8	-0.111 4	10.539 1	-0.043 1	10.644 2
9	-0.122 5	10.959 9	-0.097 9	10.974 4
10	-0.214 2	13.509 1	-0.155 6	13.565 2
11	-0.013 2	16.006 6	-0.011 8	15.969 2
12	-0.104 0	17.314 4	-0.072 7	17.503 7
13	-0.010 3	19.323 4	-0.012 1	19.352 5
14	-0.161 9	20.445 3	-0.108 2	20.457 9
15	-0.015 2	22.193 4	-0.014 2	22.132 2
16	-0.198 5	23.907 4	-0.141 4	23.932 5
17	-0.011 3	25.938 6	-0.010 0	25.852 9
18	-0.049 9	28.021 1	-0.066 9	28.075 2
19	-0.020 4	29.618 8	-0.016 6	29.609 9
20	-0.110 9	31.385 8	-0.077 8	31.511 8
21	-0.082 3	33.494 6	-0.060 0	33.486 1
22	-0.120 1	34.619 9	-0.087 3	34.618 3
23	-0.089 7	36.777 2	-0.0799	36.803 2
24	-0.136 5	38.618 9	-0.097 3	38.654 6

为了研究与机组转频相对应的振动特性, 表 4 中列出了输水发电系统 1~24 阶的自由振动频率。分析表 4 中数据可知: 无论是发电工况还是抽水工况, 输水发电系统的各阶自由振动频率的衰减因子均为 -0.359 5~-0.004 5, 都是负值, 表明各阶自由振动都是衰减的, 系统具有稳定的运行特性, 输水发电系统的各阶自由振动不会发展成持续的振荡。对比图 6 中发电方向和抽水方向的各阶自由振动频率和衰减因子可知, 尽管水流方向相反, 但是两种运行工况的各阶自由振动频率数值基本一致, 仅衰减因子大小明显不同。这是因为系统的各阶自由振动频率中, 低阶振频与调压室水位波动周期对应, 高阶自由振动频率与水锤波在管道中的反射规律相关, 当机组运行工况变化时, 管道长度、面积和管道布置形式保持不变, 不会影响调压室水位的波动周期和管道中水锤波的反射特性, 因此各阶自由振动频率不变, 只是系统各阶自由振动的衰减因子随工况改变。并且抽水工况衰减因子模值略小, 表

明抽水工况稳定性不及发电工况。

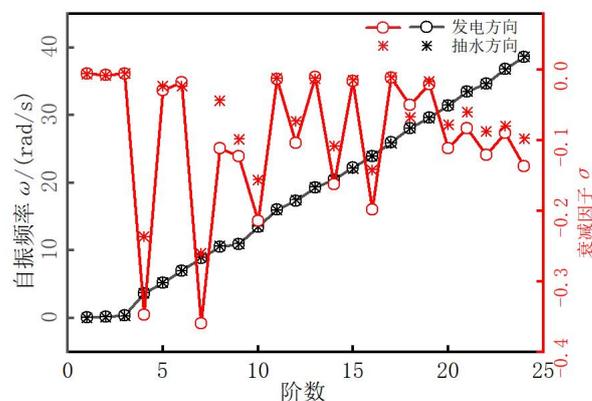


图 6 发电工况和抽水工况自由振动复频率
Fig. 6 The complex frequency of free vibration in power generation and pumping conditions

考虑到实际运行中各管道的波速一般只能近似确定, 即水锤波速会在一定范围内变化, 表 5 中列出了波速增大 10% 时在发电和抽水两个方向运行的自由振动复频率。

表5 输水发电系统波速增大10%的自由振动频率和衰减因子

Tab. 5 The free vibration frequencies and damping factors when the wave speed of the water conveyance and power generation system increases by 10%

阶型 k	Case3: 发电方向, 计算波速增大10%的复频率		Case4: 抽水方向, 计算波速增大10%的复频率	
	衰减因子 σ	自由振动频率 ω /(rad/s)	衰减因子 σ	自由振动频率 ω /(rad/s)
1	-0.005 4	0.069 1	-0.005 3	0.069 2
2	-0.006 9	0.149 6	-0.007 7	0.154 9
3	-0.005 0	0.341 2	-0.004 5	0.335 8
4	-0.346 8	4.030 2	-0.236 3	4.102 6
5	-0.029 5	5.777 9	-0.022 9	5.766 4
6	-0.017 9	7.641 0	-0.023 2	7.696 1
7	-0.357 6	9.695 5	-0.259 7	9.866 9
8	-0.110 6	11.594 8	-0.043 0	11.708 4
9	-0.124 4	12.060 2	-0.098 4	12.074 1
10	-0.214 9	14.867 2	-0.155 8	14.924 9
11	-0.013 2	17.607 3	-0.011 8	17.566 2
12	-0.104 1	19.047 9	-0.072 7	19.254 9
13	-0.010 3	21.255 8	-0.012 1	21.287 7
14	-0.161 9	22.492 4	-0.108 2	22.504 8
15	-0.015 2	24.412 9	-0.014 2	24.345 4
16	-0.198 6	26.301 9	-0.141 4	26.327 4
17	-0.011 3	28.532 4	-0.010 0	28.438 2
18	-0.050 3	30.823 2	-0.067 5	30.885 7
19	-0.020 4	32.580 5	-0.077 8	34.663 3
20	-0.111 0	34.525 2	-0.016 6	32.570 8
21	-0.083 9	36.839 1	-0.060 5	36.832 3
22	-0.120 9	38.081 1	-0.087 6	38.079 6

分析表5中数据可知:管道波速增大10%,发电方向和抽水方向自由振动复频率的衰减因子全为负值,输水发电系统具有稳定的运行特性;且发电方向各阶自由振动频率和抽水方向各阶自由振动频率基本一致,说明系统的各阶自由振动频率与运行工况无关。机组发电工况运行时原波速的复频率和波速增大10%的复频率对比如图7所示。由图7可知:管道波速的变化只对第4阶及以上的高阶自由振动频率有影响,波速的增加使高阶自由振动频率数值增大,且阶数越高,高阶自由振动频率的偏移量越大;波速的变化对各阶自由振动频率的衰减因子影响很小。这表明考虑到水体和管道弹性对水锤波速的影响,仅系统的高阶自由振动频率会有所变化,在进行系统可能的振源分析中,要考虑合理的波速取值。

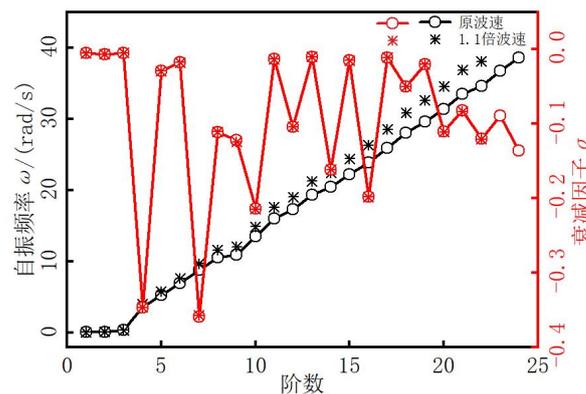


图7 发电方向水锤波速增大10%复频率对比
Fig. 7 Comparison of complex frequencies when the wave speed in the power generation direction increases by 10%

对抽水蓄能电站输水发电系统过渡过程进行特征线法计算,得到发电方向双机甩负荷、导叶25s直线关闭时引水事故闸门井、尾水调压室、尾水检修闸门井的水位波动时域过程线,如图8所示。

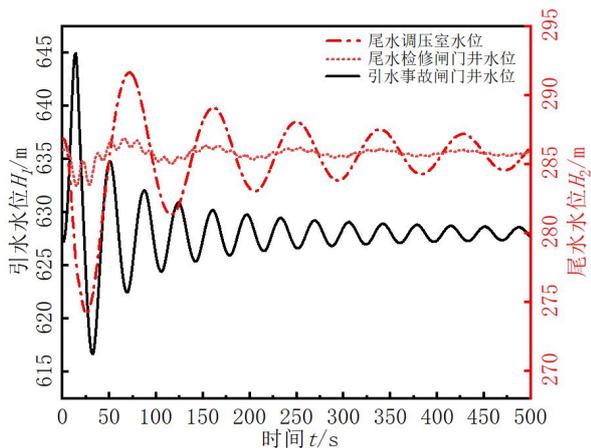


图 8 发电方向甩负荷调压室、闸门井水位波动过程

Fig. 8 Water level fluctuation of surge tank and gate shaft during load rejection in power generation

表 6 调压室和闸门井水位波动周期比较分析

Tab. 6 Comparison of the water level fluctuation periods of surge tanks and gate shafts

不同计算方法得到的周期	引水事故闸门井	尾水调压室	尾水检修闸门井
理论公式计算周期 T_1/s	36.103	88.371	14.411
特征线法计算周期 T_2/s	36.560	89.209	14.442
自由振动计算周期 T_3/s	42.000	90.929	18.420

3.2 输水发电系统各阶阵型分析

自由振动分析可得到输水发电系统的各阶自由振动频率, 该信息可反映系统的频域特性, 并评估系统的运行稳定性。但在不同的扰动源及其幅频特性下, 系统各阶自由振动频率的响应特性尚不明确, 需要根据常见的扰动边界进行针对性的强迫振动研究。

考虑到机组在运行过程中可能受到尾水管涡带、上下游水库水位波动以及机组动静干涉、旋转失速等不稳定流态的扰动, 针对最常见的尾水管涡带频率以及接近转频的扰动进行了强迫振动阵型分析。其中机组额定转速为 333.3 r/min (即 34.903

condition

根据调压室水位波动周期 T 的理论计算公式

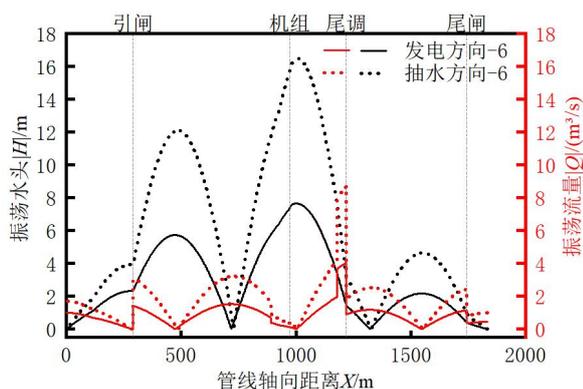
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{LA_s}{gA}}$$

(式中: L 为引/尾水隧洞长度; A 为

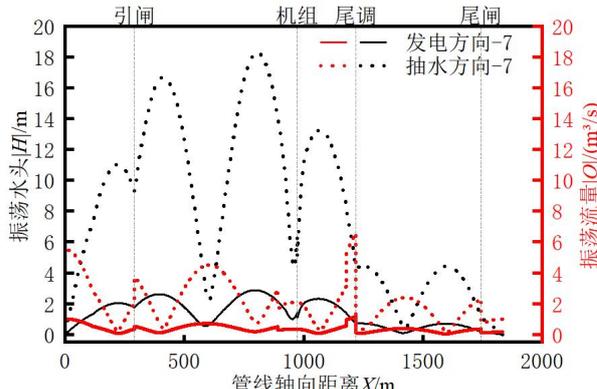
引、尾水隧洞横截面积; A_s 为调压室大井面积)、

特征线法计算得到的水位波动时域过程线、自由振动前 3 阶频率, 这 3 种计算方法得到的尾水调压室和闸门井水位波动周期见表 6。其中, 前 3 阶自由振动频率周期分别为 42.000、90.929 和 18.420 s, 分别接近引水事故闸门井、尾水调压室和尾水检修闸门井的水位波动周期, 但由于自由振动计算中考虑了管道的水头损失, 所以自由振动的计算周期大于理论周期。

rad/s), 接近系统自由振动分析的第 22 阶自由振动频率; 尾水管涡带扰动频率的可能范围为 0.167~0.500 倍转频^[26], 即频率范围为 5.829~17.452 rad/s, 对应输水发电系统的第 6—12 阶自由振动频率。拟定在抽水蓄能电站输水发电系统进口引入幅值为 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 的余弦变化的流量扰动, 即 $Q_u = \cos(\omega t)$, 代入第 6—12 阶和第 22 阶自由振动频率, 得到沿较长支路 (即 2 号机组所在支路) 输水发电系统的各阶振型, 如图 9 所示, 图中横坐标为从上游水库进口位置计及的轴向距离, 纵坐标为管道断面流量和压力的振荡幅值。



(A) 6 阶振型



(B) 7 阶振型

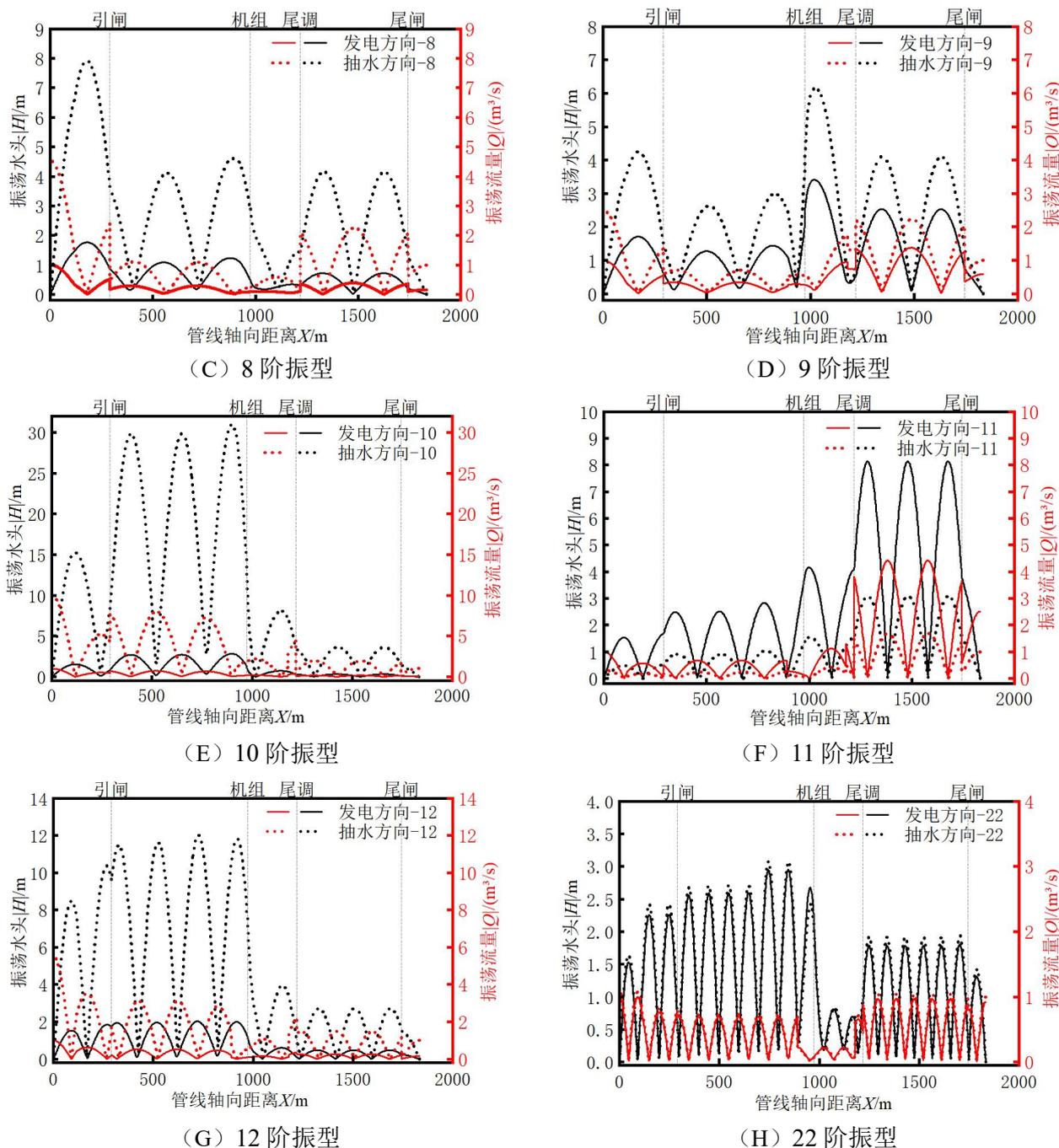


图9 输水发电系统各阶振型图

Fig. 9 Mode shapes of the water conveyance and power generation system

由图9可知: 1)当机组稳定运行时, 微小的流量振荡会引起管道断面较大的压力振荡。机组在发电方向运行时, 当外界扰动源的振荡频率接近第6阶和第11阶自由振动频率时, 管道沿线压力振荡幅值最大, 分别为7.638 m和8.134 m; 在抽水方向运行时, 外界扰动源的振荡频率接近第6阶、第7阶和第10阶自由振动频率时, 管道内部的压力振荡幅值最大, 分别为16.510、18.300和30.671 m, 表明对应阶数的自由振动频率较为危险, 因此, 机组在发电方向运行时应尽量避免或削弱频率与第6阶和第11阶自由振动

频率接近的扰动, 抽水方向运行时则尽量避免与第6阶、第7阶和第10阶自由振动频率接近的扰动, 以免管道内部压力振荡振幅过大导致事故发生。

2)除第11阶和第22阶振荡频率外, 抽水方向的压力振荡幅值明显大于发电方向。这表明在相同的扰动作用下, 相对于发电方向, 机组在抽水方向运行时更容易产生高幅振荡, 该现象主要与机组抽水工况下的阻抗特性、调压室和闸门井抽水方向的反射特性, 以及分岔管道的反射特性等密切相关。另外, 尾水调压室前后管道压力振荡幅值相差较大, 说明尾水调压室可以很好地反射水锤波, 不存在“水

击穿室”调压室失效的现象。工程应用中应重点监测调压室前后断面压力振荡幅值特性,以检验、预防是否存在调压室失效现象,避免因调压室失效而带来的隧洞结构损坏。最后,针对该给定的输水发电系统,除了第11阶振型之外,尾水隧洞中的压力振荡幅值都小于引水压力管道中的压力振荡幅值,即在多数振动模式下,引水压力管道上平段整体呈现出较为一致的、明显的振荡现象,而当系统内部发生接近第11阶自由振动频率的扰动时,尾水管道内部压力振荡幅值较大,应注意压力波腹断面的结构安全问题。

4 结论

为评估抽水蓄能电站输水发电系统的振动特性和运行稳定性,建立了输水发电系统的水力振动分析模型,揭示了典型工况下系统的水力振动特性及其共振的可能性,主要结论如下:

1) 可逆式机组在额定工况下运行时,抽水和发电两个方向运行的衰减因子皆在-0.3595至-0.0045之间,都是负值,引水发电系统的各阶自由振动都是衰减的,系统具有稳定的运行特性,输水发电系统各阶自由振动不会发展成为持续的振荡。

2) 当抽水蓄能电站输水发电系统的管道布置及参数确定时,不同运行工况下系统的各阶固有频率基本不变,工况的转换及水流方向的变化只影响各阶衰减因子的大小。

3) 通过振型分析得到了不同扰动频率下输水发电系统各断面的流量和压力振荡幅值,其中,发电方向运行时,第6阶和第11阶自由振动压力振荡幅值最大,分别为7.638 m和8.134 m;抽水方向运行时,第6阶、第7阶和第10阶自由振动压力振荡幅值最大,分别为16.510、18.300、30.671 m,建议在抽水蓄能机组发电或抽水运行监测中分别加强与第6、11阶和第6、7、10阶频率一致或接近的频率成分的实时识别与抑制,以保障输水发电系统的安全运行。同时,相同幅值扰动源作用下,抽水方向的振荡幅值明显大于发电方向的振荡幅值,抽水方向更容易产生高幅振荡。

4) 尾水调压室位置设置合理,各振型中未出现调压室失效现象;第11阶振型中尾水隧洞压力振荡幅值最大,需要注意尾水隧洞相关断面的结构安全。

本文通过自由振动和强迫振动分析得到了

系统的各阶自由振动频率以及阵型图,可以评估输水发电系统的运行稳定性,并识别系统的危险频率和危险断面,但对于危险频率的形成机制和阵型图深层信息的挖掘有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 任伟楠,朱方亮,韩冬,等.抽水蓄能行业发展现状与展望[J].水电与抽水蓄能,2025,11(1):4-10.[REN W N,ZHU F L,HAN D,et al.Current status and future development of pumped storage industry[J].China Renewable Energy Engineering Institute,2025,11(1):4-10.]
- [2] ELALFY D A,GOUDA E,KOTB M F, et al.Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends[J].Energy Strategy Reviews, 2024,54:101482.
- [3] 任岩,侯尚辰,韩宇平,等.基于平抑风光波动的矿坑抽水蓄能电站出力与机组特性研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):20-31.[REN Y,HOU S C,HAN Y P,et al.Study on the output and unit characteristics of pumped storage power station utilizing abandoned mine pits for smoothing the fluctuation of wind and photovoltaic outputs[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025, 46(1):4-10.]
- [4] 莫巨华,王浩,王超,等.基于卧式抽蓄的风光水储能联合运行优化调度研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):1-9.[MO J H,WANG H,WANG C,et al.Optimized scheduling of wind-solar-hydro energy storage joint operation based on horizontal pumped storage[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(1):1-9.]
- [5] LI J X,YUAN J X,YUE X X.Optimizing multi-objective hybrid energy systems with pumped hydro storage for enhanced stability and efficiency in renewable energy integration[J].Engineering Science And Technology-An International Journal,2025,69:102142.
- [6] CUI Z L,GUO W C.Energy coupling and surge wave superposition of upstream series double surge tanks of pumped storage power station[J].Journal of Energy Storage,2024,101:113928.
- [7] GUO L,XU C,ZHANG F,et al.Variable speed pumped storage units in China: Current status and development[J].Energy Reports,2025,13:2815-2828.
- [8] 胡昊,许昭一,崔争艳,等.基于大语言模型的抽水蓄能电站智能运维辅助系统构建研究[J].华北水利水电大学学报(自

- 然科学版),2025,46(5):34-42.[HU H,XU Z Y,CUI Z Y,et al. Intelligent operation and maintenance for pumped storage power stations based on large language Model[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025,46(5):34-42.]
- [9] SHI G T,WANG N,KIU H H,et al.Study on the flow and pressure pulsation characteristics in the hump region of pump-turbine based on C-shaped blade design[J]. Journal Of Energy Storage,2025,119:116246.
- [10] GUO P C,LI Y Y,SUN L G.Dynamic behavior and energy dissipation analysis of pump turbine in unstable S characteristic zone[J].Journal Of Energy Storage,2024,102:114275.
- [11] GUO PC,LI Y Y,WANG Z N,et al.Unsteady vortices and system instability of pump turbines:An investigation of the S-shaped region[J].Physics of Fluids,2025,37(8): 085259.
- [12] LIU Y,YU X D,QIU W X,et al.Instability mechanism and vibration performance of a pumped storage power station under runaway conditions[J].Physics of Fluids,2024,36(10):104125.
- [13] ZHOU J X,SHEN A L,KARNEY B W,et al.Numerical-based studies on hydraulic vibration of pipe flow in hydropower systems[J].Journal of Hydraulic Research,2022,60(4):557-567.
- [14] LIAO W J,ZHANG J,CHEN S,et al.Extreme water hammer pressure of spiral case in hydropower station with super long headrace tunnel and surge tank during load rejection:mechanism analysis and improvement measures[J].Physics of Fluids,2025,37(12):124114.
- [15] WYLIE E B,STREETER V L,Suo L S.Fluid Transients in Systems[M].N.J,Prentice Hall,Inc,Englewood Cliffs,1993,190-191.
- [16] YU X D,ZHANG J,FAN C Y,et al.Stability analysis of governor-turbine-hydraulic system by state space method and graph theory[J].Energy,2016,114:613-622.
- [17] LI G H,ZHANG J,WU X M,et al.Small-signal stability and dynamic behaviors of a hydropower plant with an upstream surge tank using different PID parameters[J]. IEEE ACCESS,2021. 9:104837-104845.
- [18] CHEN Y Z,WU F,SHI L J,et al.Analysis and suppression of oscillations in doubly fed variable speed pumped storage hydropower plants considering the water conveyance system[J].Sustainability,2024,16(19):8715.
- [19] SHAHGHOLIAN G.Modelling and simulation of low-head hydro turbine for small signal stability analysis in power system[J].Journal of Renewable Energy and Environment, 2016,3(3):11-20.
- [20] CHEN S,CAO X X,LIU Y,et al.Multi-frequency oscillation characteristics and stability of the pumped storage power station based on a theoretical analytical method[J].Journal Of Energy Storage,2024,102:114016.
- [21] 朱渊岳,樊红刚,陈乃祥,等.蓄能电站复杂管道系统自激振动的防止和消除[J].清华大学学报(自然科学版), 2006,46(8):1434-1437.[ZHU Y Y,FAN H G,CHEN N X,et al. Prevention of self-excited oscillations in complicated water diversion channels of pumped storage power stations[J].Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2006,46(8):1434-1437.]
- [22] 叶复萌,朱渊岳,樊红刚,等.抽水蓄能电站复杂管系的自激振动研究[J].水力发电学报,2007,26(4):135-140.[YE F M,ZHU Y Y,FAN H G,et al.Research on self-excited oscillation happened in a complex pipe system of a pumped storage power station[J].Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(4):135-140.]
- [23] ZHOU J X,KARNEY B W,HU M,et al.Analytical study on possible self-excited oscillation in S-shaped regions of pump-turbines[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part A:Journal of Power and Energy, 2011,225(8):1132-1142.
- [24] 刘紫蕊,杨峰,程永光,等.抽水蓄能电站输水系统水力振荡可能性分析[J].水力发电学报,2019,38(9):111-120.[LIU Z R,YANG F,CHENG Y G,et al.Discussion on hydraulic oscillations of water transfer systems in pumped-storage power stations[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2019,38(9):111-120.]
- [25] ZHENG Y,CHEN Q J,CHEN J B,et al.Frequency-domain stability analysis for hydropower plants with complex tailrace flow using the overall transfer matrix model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,149(11):04023042.
- [26] SHEN A L,CHEN Y M,ZHOU J X,et al.Hydraulic vibration and possible exciting sources analysis in a hydropower system[J].Applied Sciences,2021,11(12):5529.

Study on the Hydraulic Vibration Characteristics of the Water Conveyance and Power Generation System in Pumped-storage Power Stations

ZHU Mengjun¹, DUAN Zhijun¹, MAO Yutong², ZHOU Jianxu², WANG Feng¹, MA Jia¹, WEI Hongwei¹

(1.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd.,Wuhan 430063,China;

2.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: **【Objective】**The operating conditions of Pumped Storage Power Stations(PSPS) change frequently, and the flow state inside their water conveyance and power generation systems is often in a disorderly and complex state, which may induce unstable oscillations in the system. Research on the hydraulic vibration characteristics of the system aims to clarify its frequency response and mode shape properties, thereby providing a basis for ensuring the safe and stable operation of the system. **【Methods】**Based on the theory of hydraulic vibration, a hydraulic vibration analysis model for a system with two turbines sharing the same upstream and downstream pipeline and equipped with a tailrace surge tank was established using the transfer matrix method. Through free vibration analysis, the complex frequencies and vibration modes of each order of the system were solved, and the vibration characteristics were analyzed specifically to evaluate the stability of the system. **【Results】**①The results show that in both power generation and pumping conditions, all the damping factors of the complex frequencies are between -0.359 5 and -0.004 5, indicating that each order of free vibration shows a damping characteristic. The system is stable and has no risk of self-excited vibration. ②Moreover, the frequencies of each order of free vibration are mainly determined by the layout and pipeline parameters of the system and are not related to the operating conditions. Variations in operating conditions solely influence the magnitude of the damping factors. The first three orders of free vibration frequencies correspond to the water level fluctuation periods of the tailrace surge tank, the upstream accident gate shaft, and the tailrace maintenance gate shaft, respectively. The higher-order free vibration frequencies are dominated by the elasticity of the water and are shifted by the wave speed of the pipeline, and the shift increasing with the order. ③The pressure oscillation amplitudes of the 6th and 11th orders in the power generation direction and the 6th, 7th, and 10th orders in the pumping direction are relatively large, the values are 7.638, 8.134, and 16.510, 18.300, 30.671 m, respectively, and the disturbances of the related frequencies need to be controlled carefully. ④Under the same perturbation of equivalent magnitudes, the amplitude of pressure oscillations in the pumping mode is significantly greater than that in the power generation conditions, thereby requiring more attention to operational safety during pumping operations. **【Conclusion】**The study of the hydraulic vibration characteristics of a PSPS reveals the frequency domain properties and mode shape features of the water conveyance and power generation systems. These findings facilitate stability analysis and the identification of dangerous frequency sources, providing critical technical support for the safe and stable operation of the power station.

Keywords: pumped-storage power station, two units sharing the same upstream and downstream pipelines, hydraulic vibration, transfer matrix method, stability analysis