

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221796

孤网模式下基于 HBBC 的水轮机调节系统稳定性 量化分析方法研究

陈金保^{1,2}, 任刚³, 丁琪琦³, 邹屹东^{1,2}, 郑阳¹, 肖志怀^{1,2}

(1. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水力机械过渡过程教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中国长江电力股份有限公司溪洛渡水力发电厂, 云南 永善 657300)

摘要: 针对目前孤网模式下水轮机调节系统(hydraulic turbine regulating system, HTRS)稳定性研究方法忽略水轮机非线性问题, 结合 Hopf 分岔理论、二分法和稳定性判据, 提出了一种考虑水轮机非线性的控制器参数约束确定算法(controller parameter constraint determination algorithm based on Hopf bifurcation theory, bisection method and stability criterion, HBBC), 以实现孤网模式下非线性水轮机调节系统的全工况稳定性分析。首先搭建了孤网模式下含非线性水轮机模型的高精度 HTRS 数值仿真平台, 然后详细介绍了基于 HBBC 的稳定域约束定量计算过程。最后以某实际水电站为例, 基于 HBBC 计算了孤网模式下非线性 HTRS 全工况下的稳定域, 并在特殊工况下对稳定域计算结果进行了验证。结果表明, 在 HTRS 稳定性分析中, HBBC 可取代传统的稳定域计算方法, 在准确性和可靠性方面优于后者; HTRS 存在稳定域较小的“恶劣工况点”。

关键词: 水电机组; 孤网模式; Hopf 分岔; 神经网络; 二分法

Study on a quantitative stability analysis method of a hydraulic turbine regulating system based on HBBC in frequency control mode

CHEN Jinbao^{1,2}, REN Gang³, DING Qiqi³, ZOU Yidong^{1,2}, ZHENG Yang¹, XIAO Zhihui^{1,2}

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic Machinery Transients, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, 430072, China
3. Xiluodu Hydropower Plant, China Yangtze Power Co., Ltd., Yongshan 657300, China)

Abstract: Aiming at the fact that the current stability research methods of hydraulic turbine regulating system (HTRS) under frequency control mode (FCM) ignore hydro-turbine nonlinearity, a controller parameter constraint determination algorithm (HBBC) considering hydro-turbine nonlinearity is proposed. This is done by combining Hopf bifurcation theory, and a bisection method and stability criterion, to realize the stability analysis of the nonlinear HTRS of all operating conditions in FCM. First, a high-precision nonlinear HTRS numerical simulation platform containing a nonlinear hydro-turbine model is built in FCM. Then a quantitative calculation process of stability region constraints based on HBBC is introduced in detail. Finally, taking an actual hydropower station as an example, the stability region of nonlinear HTRS of all operating conditions in FCM is calculated based on HBBC. The calculation results of the stability region in special operating conditions are verified. The results show that HBBC can replace the traditional stability region calculation method in HTRS stability analysis, and is superior in accuracy and reliability; HTRS has some "bad operating conditions" with the small stability region.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51979204 and No. 52009096).

Key words: hydropower unit; frequency control mode; Hopf bifurcation; neural network; bisection method

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51979204, 52009096); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2042022kf1022); 中国博士后科学基金项目资助(2022T150498)

0 引言

随着风电、光伏等间歇性可再生能源大比例增加, 电力系统输电网络构架及运行控制日趋复杂^[1-2]。作为具有高度灵活性的优质能源, 水电机组将根据需要运行在孤网模式或并网模式^[3]。孤网模式即频率控制模式(frequency control mode, FCM); 并网模式包括功率控制模式和开度控制模式。相比并网模式, 在孤网模式下, 担负基荷的水电机组调节系统动态特性对于负荷保障更为重要^[4-5]。然而, 由于饱和非线性, 水轮机调节系统(hydraulic turbine regulating system, HTRS)的稳定域难以直接计算, 导致控制器参数通常设置的较小。因此, 如何精确计算孤网模式下水轮机调节系统稳定域成为行业研究的热点。

水轮机调节系统是一个复杂的非线性系统, 包括调速器、引水系统、水轮机、发电机和电网等^[6]。水轮机在很大程度上代表了系统的动态特性, 直接影响 HTRS 仿真平台的准确性。为便于计算, 在分析系统稳定性时, 通常采用线性水轮机模型。文献[7]构建了分段线性混流式水轮机模型, 并基于 Hopf 分岔理论在全工况范围研究了 HTRS 稳定性。基于分数阶微积分理论, 文献[8]建立了 HTRS 的分数阶数学模型, 然后通过非线性动力学分析了其稳定性, 并研究了不同分数阶下弹性水锤对控制器参数的影响。文献[9]在考虑压力管道弹性水锤模型和二阶发电机模型的情况下, 建立了水轮机调节系统的非线性动力学模型, 并研究了考虑负荷突增过程的稳定性。文献[10]建立了倾斜尾水洞 HTRS 的非线性数学模型, 并从 Hopf 分叉的存在性和方向性的角度分析了不同状态参数下 HTRS 的稳定性特征。然而, 通过对非线性水轮机模型进行线性化, 只能粗略地分析 HTRS 的稳定性, 包括非线性水轮机的 HTRS 稳定性分析方法需要进一步探索。

实际上, 制约非线性系统稳定性分析精度的是稳定性判据。对于不使用传递函数、状态空间方程等形式表示的非线性系统, 是无法应用劳斯稳定判据、奈奎斯特判据、分岔理论等稳定性判据的^[11]。李雅普诺夫第二法是一种借助一个李雅普诺夫函数直接对系统稳定性进行判断的方法, 普遍适用于线性系统、非线性系统及时变系统^[11]。根据李雅普诺夫第二法可知: 若非线性系统响应的幅值是有界的, 则可判断系统稳定。然而, 该判定方法将临界稳定的系统判定为稳定系统, 与工程实际不符。为此, 需要探究更适宜的非线性系统稳定性判据。

结合李雅普诺夫第二法特点, 本文提出了基于系统平稳状态下某段时间多变量积分值的 HTRS 稳定性判据。同时, 鉴于现有文献稳定性分析中对水轮机非线性考虑不足, 基于 Hopf 分岔理论、二分法和所提稳定性判据提出了一种考虑水轮机非线性特性的控制器参数约束确定算法(controller parameter constraint determination algorithm based on Hopf bifurcation theory, bisection method and stability criterion, HBBC), 并结合实际电站数据进一步研究了孤网模式下 HTRS 的稳定性。

1 水轮机调节系统仿真平台

1.1 引水系统模型

引水系统包括上下游水库、引水管道、水轮机流道、尾水管等^[12-15]。对于压力管道小于 600~800 m 的水电站, 采用刚性水击模型即可满足计算精度要求, 反之需要考虑水流和管道弹性造成的影响, 采用简化弹性水击模型或其他模型来描述管道中流体的运动^[16-17]。考虑本文研究的机组压力管道长度较短, 引水系统采用刚性水击模型, 其传递函数 $G_h(s)$ 为

$$G_h(s) = -T_w s \quad (1)$$

式中, T_w 为水流惯性时间常数。

1.2 水轮机模型

水轮机是参数可变、饱和非线性的原动机, 其模型精度对于 HTRS 仿真平台至关重要, 通常可以建立非线性模型或线性模型, 如式(2)和式(3)^[5]所示。在对模型精度要求高时, 一般采用基于特性曲线的非线性模型, 反之采用线性模型。为精确表征水轮机真实特性, 本文基于 BP 神经网络(back-propagation neural network, BPNN)构建了水轮机流量特性神经网络(discharge characteristic neural network, DCNN)和力矩特性神经网络(torque characteristic neural network, TCNN)。首先采用读图软件获取包含 DCNN 和 TCNN 样本数据的原型水轮机试验数据, 并结合 TCNN 样本数据与 BPNN 构建开度特性神经网络(guide vane opening characteristic neural network, GCNN); 然后结合实际运行数据和改进灰狼优化算法(improved gray wolf optimizer, IGWO)^[18]修正 DCNN 和 TCNN 样本数据; 最后, 延拓 DCNN 和 TCNN 样本数据, 并基于 BPNN 构建水轮机非线性 DCNN 和 TCNN。详细建模过程如图 1 所示, 图中: Q_{11} 为单位流量, 如式(4)所示; M_{11} 为单位力矩; n_{11} 为单位转速; Y 为导叶开度; α 、 β 、 δ 和 ω 为 IGWO 中按等级划分的狼。

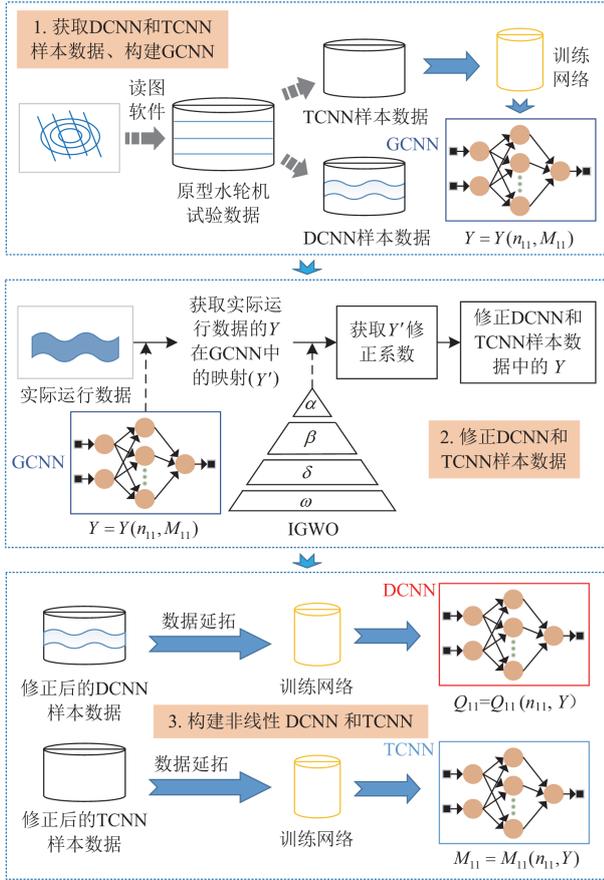


图 1 基于神经网络的水轮机建模过程

Fig. 1 Modeling process of hydro-turbine based on neural network

$$\begin{cases} Q = Q(Y, X, H) \\ M_t = M_t(Y, X, H) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} q = e_{qy}y + e_{qx}x + e_{qh}h \\ m_t = e_yy + e_x x + e_h h \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{11} = \frac{\pi n_{11} M_{11}}{30\gamma\eta} \quad (4)$$

式中： Q 为水轮机流量； M_t 为水轮机力矩； X 为机组转速； H 为工作水头； e_{qx} 、 e_{qy} 和 e_{qh} 分别为 Q 对 X 、 Y 和 H 的传递系数； e_x 、 e_y 和 e_h 分别为 M_t 对 X 、 Y 和 H 的传递系数； q 、 m_t 、 x 、 y 和 h 分别表示 Q 、 M_t 、 X 、 Y 和 H 的偏差相对值； $\gamma = \rho g$ ， ρ 是水的密度， g 是重力加速度常数； η 为水轮机效率。

1.3 调速器模型

水电站调速器包括控制器和电液随动系统^[19]。由于 PID 型控制器(proportional-integral-differential, PID)结构简单、参数易调整，被广泛应用于水电站^[20-23]。PID 型控制器具有串联和并联两种基本结构，本文研究的水电站采用的是并联 PID 型，传递函数 $G_c(s)$

如式(5)所示，其电液随动系统传递函数 $G_s(s)$ 如式(6)所示。

$$G_c(s) = \frac{u}{e} = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad (5)$$

$$G_s(s) = \frac{y}{u} = \frac{1}{T_y s + 1} \quad (6)$$

式中： u 为控制器输出； e 为控制器输入； K_p 、 K_i 和 K_D 分别为比例、积分和微分增益； T_y 为主接力器反应时间常数。

1.4 发电机模型

对于 HTRS 动态特性研究，由于发电机中的电磁暂态响应远快于水轮机的水力机械响应，通常不考虑机组电气瞬变过程，即忽略发电机转子和励磁调节器的电磁暂态^[24-27]。因此，发电机及负载特性采用经典的一阶惯性环节描述，其传递函数 $G_g(s)$ 为

$$G_g(s) = \frac{1}{T_a s + e_g} \quad (7)$$

式中： T_a 为机组惯性时间常数； e_g 为发电机负载自调节系数。

1.5 水轮机调节系统整体模型

结合基于神经网络的非线性水轮机模型、引水系统刚性水击模型、一阶发电机模型、并联 PID 控制器及其随动系统模型等模块，得到 FCM 下水轮机调节系统的整体非线性模型，如图 2 所示。图中： m_g 为发电机阻力矩； f_c 和 f 分别为给定频率和反馈频率，均为偏差相对值； Y_0 、 X_0 、 H_0 、 M_0 和 Q_0 分别为 Y 、 X 、 H 、 M_t 和 Q 的初始值； D 为转轮直径； H_r 为额定水头； X_r 为额定转速； M_r 为额定力矩； Q_r 为额定流量。

2 基于 HBBC 的 HTRS 稳定域约束定量计算

基于 HBBC 的稳定域约束计算包括：1) 建立非线性 HTRS(nonlinear HTRS, N-HTRS) 的线性化模型(linear HTRS, L-HTRS)，并获取 L-HTRS 模型的状态空间方程；2) 基于 Hopf 分岔理论计算 L-HTRS 的控制器参数约束(controller parameter constraints of L-HTRS, L-CPC)；3) 基于 L-CPC、二分法和稳定性判据求解 N-HTRS 的控制器参数约束(controller parameter constraints of N-HTRS, N-CPC)。基于 HBBC 的 N-CPC 计算过程如图 3 所示，图中： φ_1 和 φ_2 为修正系数； ε 为稳定域约束计算精度； K_{PNMAX} 和 K_{INMAX} 为 N-HTRS 稳定域内最大 K_p 和 K_i 。为确保计算结果准确性，取 $\varepsilon = 10^{-3}$ 。基于 HBBC 得到的由 K_{PNMAX} 和 K_{INMAX} 构成的数组(即 N-CPC)。需要注意的是，计算

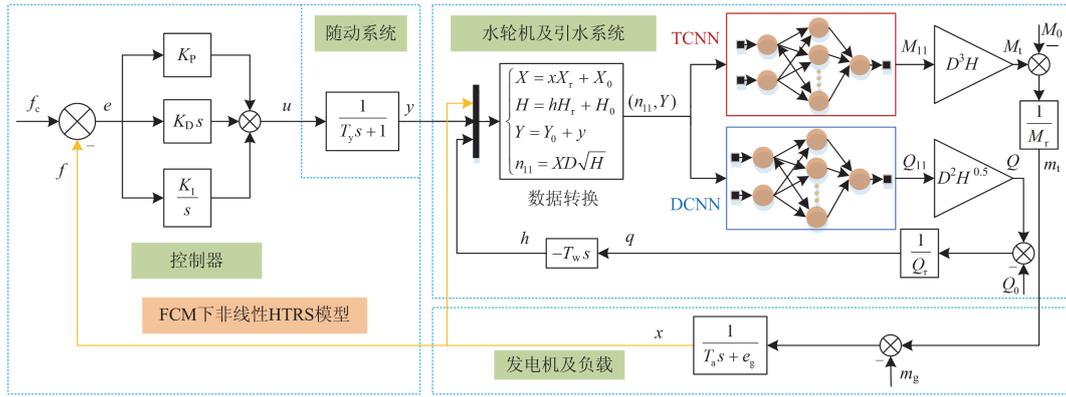


图2 水轮机调节系统整体非线性模型
Fig. 2 Overall nonlinear model of HTRS

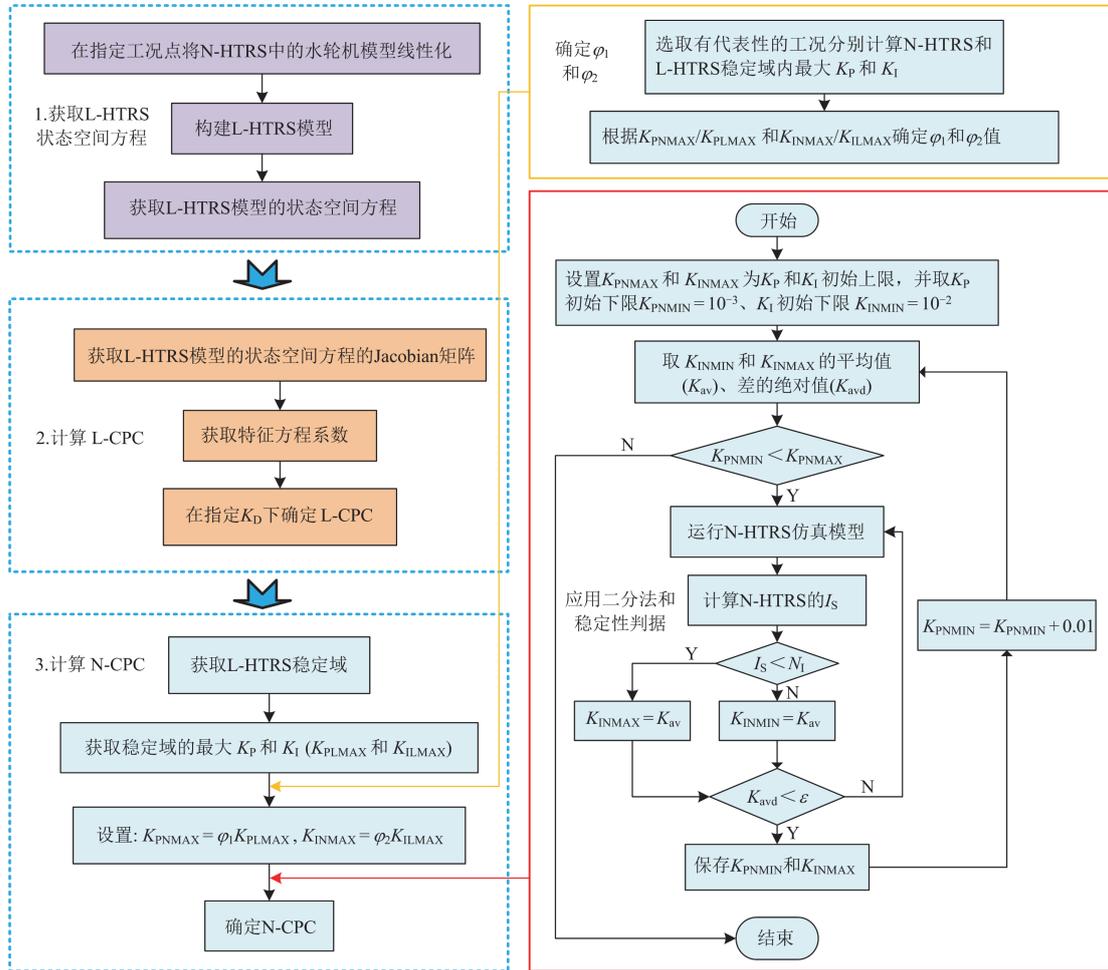


图3 基于 HBBC 的 N-CPC 计算流程

Fig. 3 N-CPC calculation process based on HBBC

L-HTRS 控制器参数约束是为了粗略确定 N-HTRS 控制器参数约束的边界条件，以缩短 N-CPC 计算时间。

2.1 获取 L-HTRS 模型的状态空间方程

通过对 DCNN 和 TCNN 的输出求偏导，计算

出式(3)中水轮机传递系数，获得线性水轮机模型。L-HTRS 获取步骤如图 4 所示，图中， Y_{max} 为最大导叶开度。

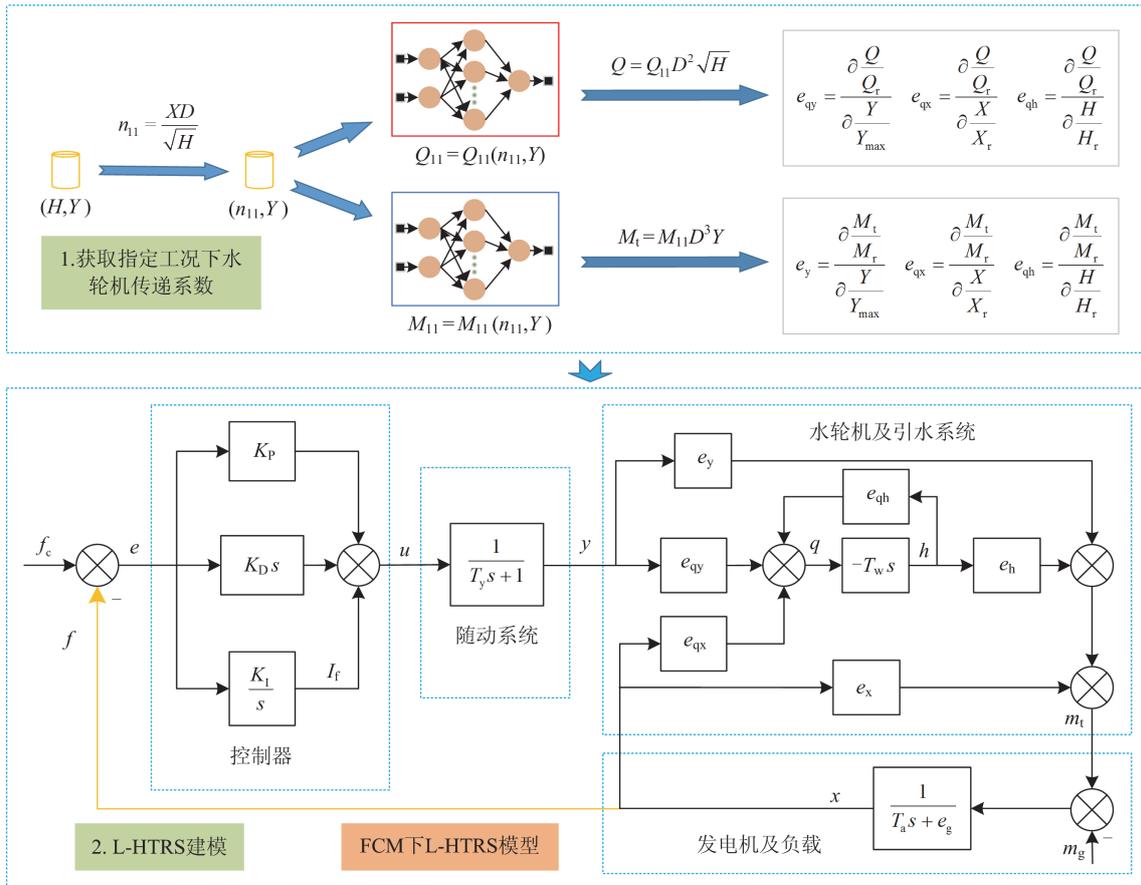


图 4 L-HTRS 构建过程

Fig. 4 L-HTRS construction process

根据图 4 和式(3)得到孤网模式下 L-HTRS 状态空间方程, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \dot{y} = \frac{1}{T_y} [K_P(f_c - f) + I_f + K_D(\dot{f}_c - \dot{f}) - y] \\ \dot{h} = -\frac{e_{qx}}{e_{qh}} \dot{x} - \frac{e_{qy}}{e_{qh}} \dot{y} - \frac{1}{e_{qh} T_w} h \\ \dot{f} = \frac{1}{T_a} (m_t - m_g - e_g x) \\ \dot{I}_f = K_I (f_c - f) \end{cases} \quad (8)$$

2.2 计算 L-CPC

对于 n 阶 L-HTRS, 其微分方程可用矩阵形式 $\dot{x} = f(x, v)$ 表示^[3], 其中 x 是状态变量的矩阵, v 是 Hopf 分岔参数。系统平衡点 (x_0, v_0) 处 Jacobian 矩阵的特征方程为

$$F(\lambda, v) = \sum_{i=0}^n p_i(v) \lambda^i = 0 \quad (9)$$

式中: p_i 是与系统参数相关的特征方程的系数; λ 是待求解特征方程的根。

在临界稳定条件下, 系统特征方程存在两个实部为 0 的特征值及 $(n-2)$ 个实部不为 0 的根^[6]。因此, 系统特征多项式满足式(10)。

$$F(\lambda) = (\lambda^2 + w^2) \left(\lambda^{n-2} + \sum_{i=0}^{n-3} a_i \lambda^i \right) \quad (10)$$

式中: w 是纯虚共轭复根的虚部; a_i 是具有非零实部特征根构成的多项式的系数。

结合式(9)和式(10), 可求解满足 L-HTRS 临界稳定性约束的所有特征值和未知参数。可通过求解平衡点处的联合方程得到 K_D 、 K_P 和 K_I 之间的关系, 如式(11)所示。

$$K_I = \frac{k_0 K_P^2 + k_1 K_P + k_2}{k_3 K_P + k_4} \quad (11)$$

式中, k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 是随工况变化的系数。

2.3 计算 N-CPC

根据式(11)确定 L-HTRS 稳定域, 然后确定典型工况下控制器参数最大约束 (K_{PLMAX} 和 K_{ILMAX}), 进一步结合二分法和稳定性判据确定 N-HTRS 的

N-CPC。其中, 稳定性判据指的是: 若稳定性指标 $I_s < N_1$, 判断系统稳定。 I_s 包含了 N-HTRS 稳态下某段时间内水轮机力矩、转速和流量的偏差相对值的积分量, 如式(12)所示。对于稳定系统, 理论上 $N_1 = 0$, 但为减少计算时间, 本文取 $N_1 = 1$ 、 $t_{\max} = 100 \text{ s}$ 、 $t_{\lim} = 10 \text{ s}$ 。

$$I_s = I_1 \int_{t_{\max}-t_{\lim}}^{t_{\max}} |\Delta m_t| + I_2 \int_{t_{\max}-t_{\lim}}^{t_{\max}} |\Delta x| + I_3 \int_{t_{\max}-t_{\lim}}^{t_{\max}} |\Delta q| \quad (12)$$

式中, I_1 、 I_2 和 I_3 是权重系数, 分别取 0.3、0.6 和 0.1。

3 仿真验证及对比研究

以中国西南部某巨型混流式水电站为例, 取 $K_D = 0$, 本文基于 HBBC 对其孤网模式下 HTRS 进行了稳定性分析。该水电站数据如表 1 所示。

表 1 某水电站水轮机调节系统参数

子系统	参数
控制器	FCM下不设死区, 输出不受限
随动系统	$T_y = 0.4594$
水轮机	$D = 6.223 \text{ m}$; $H_r = 197 \text{ m}$; 最大水头 $H_{\max} = 229.4 \text{ m}$; 最小水头 $H_{\min} = 154.6 \text{ m}$; $Q_r = 432.7 \text{ m}^3/\text{s}$
引水系统	$T_w = 1.29$
发电机	$T_a = 12.239$; $e_g = 0.176$

3.1 N-HTRS 模型验证

根据表 1 中 HTRS 参数和水轮机原型综合特性曲线构建 N-HTRS, 然后采用空载扰动数据对模型精度进行验证。3 个系统状态变量实测值与仿真值对比结果如图 5 所示, 可以看出, 仿真数据在很大

程度上与实测数据接近, 表明所建 N-HTRS 模型足够准确、可靠。

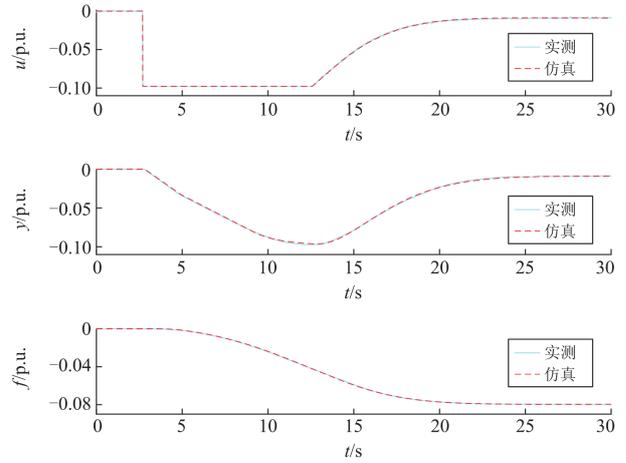


图 5 FCM 下 N-HTRS 模型验证结果

Fig. 5 Verification results of N-HTRS model under FCM

3.2 确定 ϕ_1 和 ϕ_2

选择 6 个典型工况分别计算 L-HTRS 和 N-HTRS 的稳定域, 结果如图 6 所示, 其边界值计算结果如表 2 所示。图 6 中阴影部分表示稳定域, 可以看出, 由 N-CPC 确定的 N-HTRS 稳定域在各工况下均小于由 L-CPC 确定的 L-HTRS 稳定域, 说明计算控制器约束时忽略水轮机非线性易得出误差较大的结果。

由表 2 得到各工况下的 $K_{\text{PNMAX}}/K_{\text{PLMAX}}$ 和 $K_{\text{INMAX}}/K_{\text{ILMAX}}$, 如表 3 所示。结合表 3 中参考值, 并考虑计算速度, ϕ_1 和 ϕ_2 均取 0.9。

表 2 6 个典型工况下稳定域边界值计算结果

水头	L-HTRS 稳定域内 K_{PLMAX} 和 K_{ILMAX}				N-HTRS 稳定域内 K_{PNMAX} 和 K_{INMAX}			
	$Y = 40\%$		$Y = 80\%$		$Y = 40\%$		$Y = 80\%$	
	K_{PLMAX}	K_{ILMAX}	K_{PLMAX}	K_{ILMAX}	K_{PNMAX}	K_{INMAX}	K_{PNMAX}	K_{INMAX}
$H = H_{\min}$	17.5	4.56	11.4	1.99	14.85	3.72	9.85	1.72
$H = H_r$	14.1	3.98	9.13	1.76	12.1	3.32	7.8	1.51
$H = H_{\max}$	12.2	3.6	8.03	1.63	10.5	3.03	6.95	1.4

表 3 6 个典型工况下的 $K_{\text{PNMAX}}/K_{\text{PLMAX}}$ 和 $K_{\text{INMAX}}/K_{\text{ILMAX}}$

Table 3 $K_{\text{PNMAX}}/K_{\text{PLMAX}}$ and $K_{\text{INMAX}}/K_{\text{ILMAX}}$ under 6 typical operating conditions

水头	$K_{\text{PNMAX}}/K_{\text{PLMAX}}$		$K_{\text{INMAX}}/K_{\text{ILMAX}}$	
	$Y = 40\%$	$Y = 80\%$	$Y = 40\%$	$Y = 80\%$
	$H = H_{\min}$	0.85	0.86	0.82
$H = H_r$	0.86	0.85	0.83	0.86
$H = H_{\max}$	0.86	0.87(参考值)	0.84	0.86

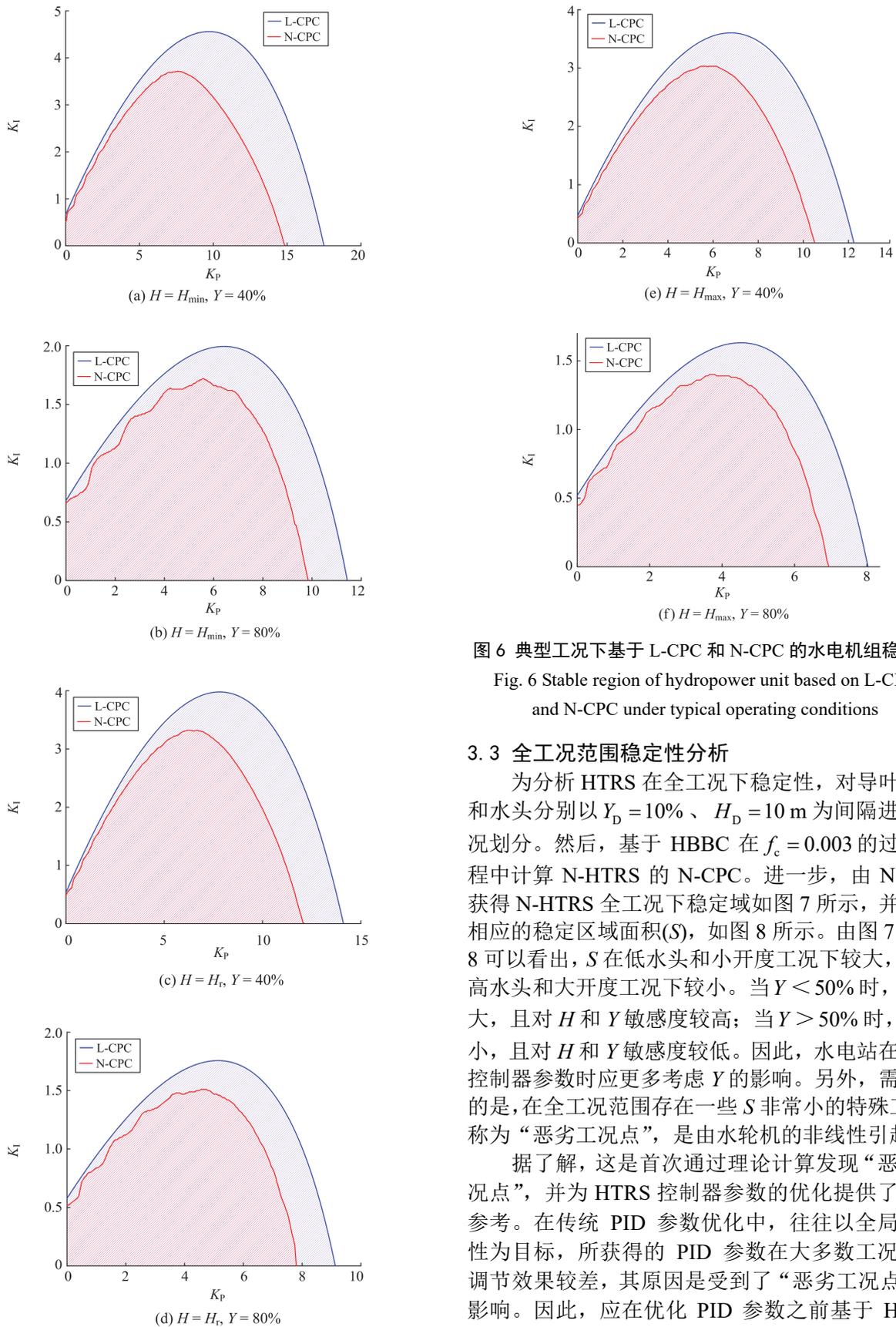


图6 典型工况下基于 L-CPC 和 N-CPC 的水电机组稳定域
 Fig. 6 Stable region of hydropower unit based on L-CPC and N-CPC under typical operating conditions

3.3 全工况范围稳定性分析

为分析 HTRS 在全工况下稳定性, 对导叶开度和水头分别以 $Y_D = 10\%$ 、 $H_D = 10\text{ m}$ 为间隔进行工况划分。然后, 基于 HBBC 在 $f_c = 0.003$ 的过渡过程中计算 N-HTRS 的 N-CPC。进一步, 由 N-CPC 获得 N-HTRS 全工况下稳定域如图 7 所示, 并计算相应的稳定区域面积(S), 如图 8 所示。由图 7 和图 8 可以看出, S 在低水头和小开度工况下较大, 而在高水头和大开度工况下较小。当 $Y < 50\%$ 时, S 较大, 且对 H 和 Y 敏感度较高; 当 $Y > 50\%$ 时, S 较小, 且对 H 和 Y 敏感度较低。因此, 水电站在整定控制器参数时应更多考虑 Y 的影响。另外, 需要注意的是, 在全工况范围存在一些 S 非常小的特殊工况, 称为“恶劣工况点”, 是由水轮机的非线性引起的。

据了解, 这是首次通过理论计算发现“恶劣工况点”, 并为 HTRS 控制器参数的优化提供了重要参考。在传统 PID 参数优化中, 往往以全局稳定性为目标, 所获得的 PID 参数在大多数工况下的调节效果较差, 其原因是受到了“恶劣工况点”的影响。因此, 应在优化 PID 参数之前基于 HBBC

找出“恶劣工况点”，并在附近划分更多工况点以减少其影响。

3.4 恶劣工况点稳定域计算结果验证

为验证图 8(b)中“恶劣工况点”处的 S ，采用不同的控制器参数进行仿真试验，结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出，两个“恶劣工况点”的 f 曲线在稳定区域内收敛，但在稳定区域外发散。该验证结果不仅证明了基于 HBBC 的 N-HTRS 控制器参数约束计算方法的合理性，也证实了“恶劣工况点”的存在。

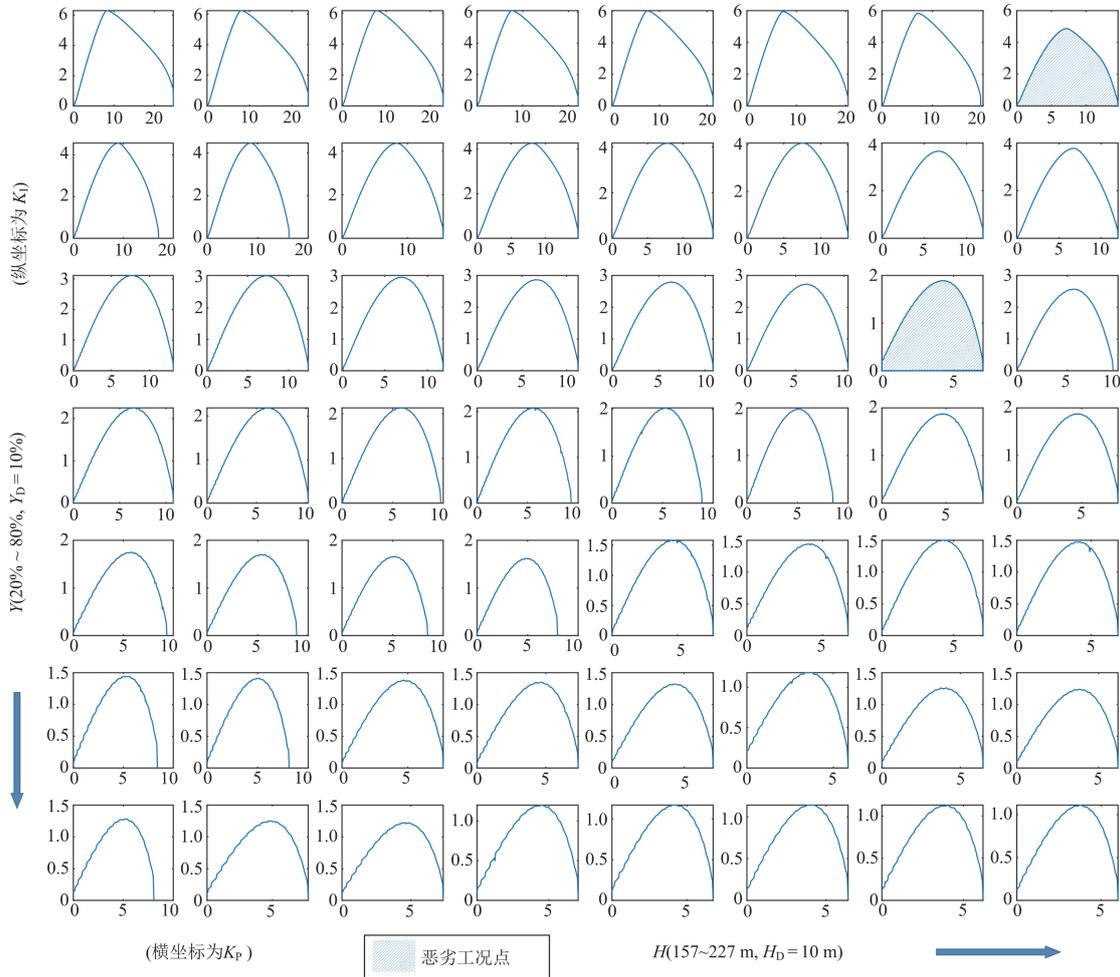


图 7 孤网模式下水电机组全工况稳定域

Fig. 7 Stable region of hydropower unit of full operating conditions under FCM

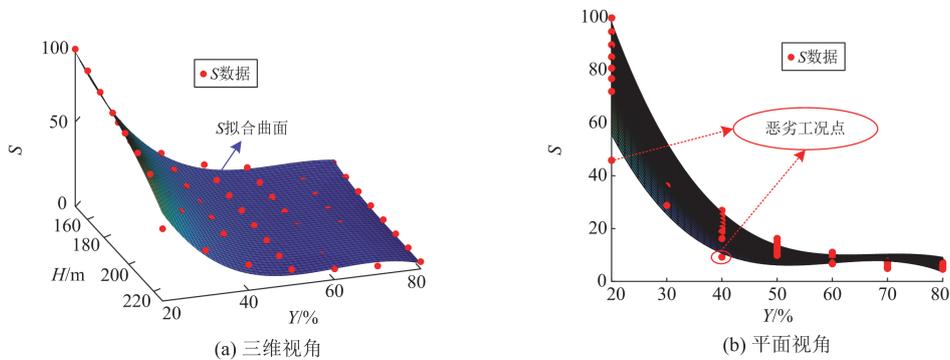


图 8 孤网模式下水电机组全工况稳定域面积

Fig. 8 Stable region area of hydropower unit of full operating conditions under FCM

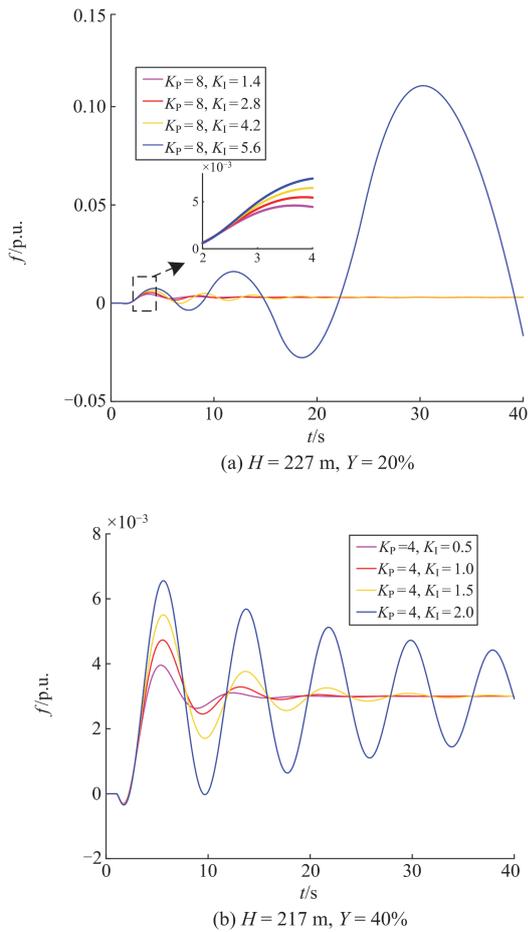


图9 恶劣工况点验证结果

Fig. 9 Verification results of bad operating points

4 结论

针对目前孤网模式下水电机组稳定性研究忽略水轮机非线性，首先构建含非线性水轮机模型的高精度水轮机调节系统仿真平台，然后结合 Hopf 分岔理论、二分法和基于系统平稳状态下某段时间多变量积分值的 HTRS 稳定性判据，提出一种考虑水轮机非线性的控制器参数约束确定算法(HBBC)，并采用实际电站数据实现了对孤网模式下非线性水轮机调节系统的全工况稳定性分析。

1) 水轮机调节系统稳定域在小开度工况下对水头和导叶开度敏感度较高，而在大开度工况下对水头和导叶开度敏感度较低。因此，水电站在整定控制器参数时应格外考虑导叶开度的影响。

2) 水轮机调节系统存在“恶劣工况点”，“恶劣工况点”处的稳定域面积远小于附近工况。为避免“恶劣工况点”的影响，在调整 PID 参数时，必须将工况划分得足够精细。

3) 提出的稳定域计算方法考虑了水轮机的非

线性同时计及了计算速度与精度，可作为水电机组稳定性分析的首选方法。

本文以孤网模式下水电机组稳定性分析为例，研究了基于 HBBC 的水轮机调节系统稳定性量化分析方法。功率模式下水轮机调节系统稳定性影响机制更为复杂，基于 HBBC 的水电机组稳定性有待进一步研究。

参考文献

[1] 负保记, 张恩硕, 张国等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of integrated energy system considering integrated demand response and a "dual carbon" mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.

[2] 国彬, 刘玉龙, 李国庆, 等. 考虑可靠性的交直流混合配电网网架与分布式电源协同优化规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 59-70.
GUO Bin, LIU Yulong, LI Guoqing, et al. Collaborative optimization planning of AC/DC hybrid distribution network frame and distributed power generation considering reliability[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 59-70.

[3] 刘冬, 胡晓, 曾荃, 等. 基于输入-输出修正的水轮机特性曲线精细化模型[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 555-564.
LIU Dong, HU Xiao, ZENG Quan, et al. Refined hydro-turbine characteristic curve model based on input-output correction[J]. Journal of Water Resources, 2019, 50(5): 555-564.

[4] 丁理杰, 刘姗姗, 史华勃. 水电高占比电网中水轮机模型对频率振荡特性影响及其适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 174-180.
DING Lijie, LIU Shanmei, SHI Huabo. Influence of a turbine model on frequency oscillation characteristics and its adaptability in a high hydro-ratio power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 174-180.

[5] 李世明, 李波, 郭文鑫, 等. 高比例水电孤网的振荡抑制与快速调频协调策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 118-124.
LI Shiming, LI Bo, GUO Wenxin, et al. Coordination strategy of oscillation suppression and fast frequency modulation in a high hydropower proportion isolated network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 118-124.

[6] CHEN Jinbao, XIAO Zhihui, LIU Dong, et al. Nonlinear modeling of hydro-turbine dynamic characteristics using LSTM neural network with feedback[J]. Energy Science & Engineering, 2021.

[7] LIU Dong, WANG Xin, PENG Yunshui, et al. Stability

- analysis of hydropower units under full operating conditions considering turbine nonlinearity[J]. *Renewable Energy*, 2020, 154: 723-742.
- [8] XU Beibei, CHEN Diyi, ZHANG Hao, et al. Modeling and stability analysis of a fractional-order Francis hydro-turbine governing system[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2015, 75: 50-61.
- [9] LI Huanhuan, CHEN Diyi, ZHANG Hao, et al. Nonlinear modeling and dynamic analysis of a hydro-turbine governing system in the process of sudden load increase transient[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 80: 414-428.
- [10] GUO Wencheng, YANG Jiandong, WANG Mingming, et al. Nonlinear modeling and stability analysis of hydro-turbine governing system with sloping ceiling tailrace tunnel under load disturbance[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106: 127-138.
- [11] GERBET D, ROBENACK K. Application of LaSalle's invariance principle on polynomial differential equations using quantifier elimination[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022, 67(7): 3590-3597.
- [12] FONTANA N, MARINI G. A methodology to assess optimal operation of a prototype for pressure regulation and hydropower generation[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021, 147(12).
- [13] GUO Pengcheng, ZHANG Hao, GOU Dongming. Dynamic characteristics of a hydro-turbine governing system considering draft tube pressure pulsation[J]. *IET Renewable Power Generation*. 2020, 14(7): 1210-1218.
- [14] GUO Wencheng, WU Fulin. Hydraulic-mechanical coupling vibration performance of pumped storage power station with two turbine units sharing one tunnel[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 53.
- [15] NAYAK J R, SHAW B, DEWANGAN N K. Generation control of isolated small hydro power plant by using DECSA optimized FPI controller[J]. *World Journal of Engineering*, 2021, 18(2): 280-292.
- [16] LIU Dong, LI Chaoshun, TAN Xiaoqiang, et al. Damping characteristics analysis of hydropower units under full operating conditions and control parameters: accurate quantitative evaluation based on refined models[J]. *Applied Energy*, 2021, 292.
- [17] 刘冬, 张辉, 任刚, 等. 特征线法及其变体在水轮机及引水系统非线性建模中的对比研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(4): 448-457.
- LIU Dong, ZHANG Hui, REN Gang, et al. Comparative study of characteristic line method and its variants in nonlinear modeling of hydraulic turbine and water diversion system[J]. *Journal of Water Resources*, 2020, 51(4): 448-457.
- [18] AL JANAIDEH M, AL SAAIDEH M, RAKOTONDRABE M. On hysteresis modeling of a piezoelectric precise positioning system under variable temperature[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 145.
- [19] ZHENG Yang, CHEN Qijuan, YAN DONG Lin, et al. Equivalent circuit modelling of large hydropower plants with complex tailrace system for ultra-low frequency oscillation analysis[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 103: 176-194.
- [20] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(4): 137-144.
- YU Jingrong, SUN Wen, YU Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid connected inverter based on adaptive inertia[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(4): 137-144.
- [21] YU Xiaodong, YANG Xiuwei, YU Chao, et al. Direct approach to optimize PID controller parameters of hydropower plants[J]. *Renewable Energy*, 2021, 173: 342-350.
- [22] ZHANG Tianyu, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Synergetic control strategy for water hammer wave and mass wave in hydropower station with downstream channel[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 81105-81122.
- [23] QU Fangle, GUO Wencheng. Robust H-infinity control for hydro-turbine governing system of hydropower plant with super long headrace tunnel[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 124.
- [24] WANG Cong, WANG Dekuan, ZHANG Jianming. Experimental study on the optimal strategy for power regulation of governing system of hydropower station[J]. *Water*, 2021, 13(4).
- [25] GUO Wencheng, XU Xinyu. Critical sectional area of surge tank based on bifurcation and chaos behaviors of hydraulic-mechanical coupling hydropower station[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 110(2): 1297-322.
- [26] HUANG Sunhua, XIONG Linyun, WANG Jie, et al. Fixed-time synergetic controller for stabilization of hydraulic turbine regulating system[J]. *Renewable Energy*, 2020, 157: 1233-1242.
- [27] LI Gaohui, ZHANG Jian, WU Xumin, 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.

收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2023-01-04

作者简介:

陈金保(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为水电机组建模与优化控制。E-mail: chenjinbaovip@163.com

(编辑 姜新丽)