

压水堆核电机组动态模型参数评价

刘涤尘¹, 王力^{1,2}, 赵洁¹, 张胜峰¹, 吴国旻³, 王骏¹, 邵尤国¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北武汉 430072; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要:压水堆核电机组动态模型中参数的稳定性和正确性对保证系统的暂态稳定具有重要意义, 因此需要设计合适的模型参数评价方法。针对压水堆核电机组动态模型, 按照内部物理边界将其分解为多个子模块模型; 根据各子模块的微分方程数学模型推导, 基于变量偏差的传递函数定性评价参数的改变对各子模块输出变量稳态值的影响; 基于参数灵敏度的终值是否为零值和灵敏度指标大小的判定, 合理选择参数的获取方案以提高参数获取效率及准确性。采用基于群体最优值摄动的粒子群优化算法获取模型参数, 算例结果验证了所提参数评价方法的有效性。

关键词:压水堆核电机组; 动态模型; 灵敏度; 粒子群优化算法; 参数评价

中图分类号: TM 623; TM 74

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.007

0 引言

压水堆核电机组具有单机容量大、核安全要求高、对电网扰动敏感等特点。建立精确有效的仿真模型及准确获取模型参数, 对电力系统动态分析和安全控制具有重要意义。在电力系统仿真中, 国内外学者对二代核电机组建立了压水堆核电机组的动态模型^[1-3], 基于 Simulink/PSASP 联合仿真技术^[4]和电力系统全过程仿真软件^[5]建立了 AP1000 核电机组模型, 但存在参数缺乏或参数准确性有限等问题, 因此亟需设计合适的压水堆核电机组动态模型的参数评价方法。

关于参数获取方法方面的研究, 已有基于实测数据的核电机组二回路系统参数辨识^[6], 但是由于核反应堆安全性的限制, 反应堆及一回路系统难以实测, 且反应堆系统具有高度复杂、非线性、时变等特点, 其模型参数的获取方式受到限制, 有待进一步验证。文献[7]采用离散序列估计方法对核反应堆模型进行参数辨识, 但算法受参数初始值的影响明显; 文献[8]基于 RELAP5 软件的仿真数据, 采用多方向搜索 MDS (MultiDirectional Search) 算法对简化的压水堆核电站模型进行参数辨识; 文献[9]采用蒙特卡罗方法对三阶堆芯中子通量的动态模型进行状态估计; 文献[10]基于核电厂的实测数据, 采用单纯形法辨识压水堆核电机组简化的一回路系统模

型参数; 文献[11]基于设备的特性试验数据, 利用 MATLAB 辨识工具箱, 对蒸汽发生器中主给水泵和给水流量随给水阀开度响应 2 个过程的传递函数进行参数辨识, 但该方法不适用于非线性系统模型。已有单纯形法等针对核电机组一回路系统模型的参数辨识方法对模型输入、输出信号及待辨识模型要求较高, 对一些非线性系统的辨识效果不理想。基于智能优化算法的参数辨识方法对输入、输出信号要求低, 主要依赖于所选定的目标函数, 因此受到广泛的关注^[12-13]。

一方面, 压水堆核电机组的变量及参数众多, 仅通过辨识结果的对比难以直接反映参数的准确性; 另一方面, 反应堆系统各子模块间相互耦合, 因此需要采用合适的方法确定单个参数的影响, 并挖掘参数对变量的影响类型及程度。已有学者将灵敏度方法用于励磁系统、风电机组、负荷的参数辨识等问题^[14-18]。文献[5]估计了压水堆核电机组模型参数影响的近似误差, 但具体参数影响行为仍需要深入分析。

本文基于压水堆核电机组的微分方程数学模型, 从微分方程和传递函数角度定性评价参数对变量的影响; 然后基于灵敏度计算, 定量评价参数在给定试验条件下对系统动态响应的影响程度, 为参数的可辨识难易程度提供依据, 有利于评价参数的准确性; 并采用基于群体最优值摄动的粒子群优化算法获取模型参数, 将参数摄动思想引入参数辨识的过程中, 以提高参数的差异性和多样化, 对灵敏度大的参数提高其辨识准确性, 有利于得到最优参数。

1 压水堆核电机组动态模型及参数影响

1.1 压水堆核电机组动态模型

a. 压水堆一回路系统数学模型。

对于以 AP1000 为代表的新一代压水堆核电机

收稿日期: 2017-10-28; 修回日期: 2018-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677137, 51307123); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2042018kf-0051); 国家电网公司科技项目(XT71-15-060)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677137, 51307123), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2042018kf0051) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(XT71-15-060)

组^[4]而言,基于机组一回路系统的主要设备、子系统边界、运行特征及运行参数可测试性,将其分解为多个子模块。其中,反应堆中子动态模块、堆芯燃料及冷却剂温度模块、蒸汽发生器模块的数学方程分别如式(1)~(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{dN_r}{dt} = \frac{\rho_{\text{sum}} - \beta}{l} N_r + \lambda C_r \\ \rho_{\text{sum}} = \rho_{\text{ext}} + \alpha_F (T_F - T_{F0}) + \alpha_C (T_{\text{av}} - T_{\text{av}0}) \\ \frac{dC_r}{dt} = \frac{\beta}{l} N_r - \lambda C_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dT_F}{dt} = \frac{F_f P_0}{\mu_f} N_r - \frac{\Omega}{\mu_f} T_F + \frac{\Omega}{2\mu_f} T_{\text{av}} + \frac{\Omega}{4\mu_f} T_{\theta 1} + \frac{\Omega}{4\mu_f} T_{\theta 2} \\ \frac{dT_{\text{av}}}{dt} = \frac{(1-F_f) P_0}{\mu_c} N_r + \frac{\Omega}{\mu_c} T_F - \frac{4M+\Omega}{2\mu_c} T_{\text{av}} + \frac{4M-\Omega}{2\mu_c} T_{\theta 1} \\ \frac{dT_{\theta 2}}{dt} = \frac{(1-F_f) P_0}{\mu_c} N_r + \frac{\Omega}{\mu_c} T_F - \frac{4M-\Omega}{2\mu_c} T_{\text{av}} - \frac{4M+\Omega}{2\mu_c} T_{\theta 2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dT_p}{dt} = \frac{2M-\Omega_p}{2\mu_p} T_{\text{HL}} - \frac{2M+\Omega_p}{2\mu_p} T_p + \frac{\Omega_p}{\mu_p} T_m \\ \frac{dT_{\text{CL}}}{dt} = -\frac{2M+\Omega_p}{2\mu_p} T_{\text{CL}} + \frac{2M-\Omega_p}{2\mu_p} T_p + \frac{\Omega_p}{\mu_p} T_m \\ \frac{dT_m}{dt} = \frac{\Omega_p}{4\mu_m} T_{\text{HL}} + \frac{\Omega_p}{2\mu_m} T_p + \frac{\Omega_p}{4\mu_m} T_{\text{CL}} - \frac{\Omega_p + \Omega_s}{\mu_m} T_m + \frac{\Omega_s}{\mu_m} K_{P_s-T_s}(P_s) \\ \frac{dP_s}{dt} = \frac{\Omega_s}{K_{P_s}} T_m - \frac{\Omega_s}{K_{P_s}} K_{P_s-T_s}(P_s) + \frac{Q_s(h_{\text{fw}} - h_s)}{K_{P_s}} \end{cases} \quad (3)$$

其中, N_r 为中子通量密度,单位为中子数/ cm^3 ,用于表示反应堆堆功率; C_r 为等效单组缓发中子先驱核密度,单位为核数/ cm^3 ; l 为反应堆中子动态模块的平均中子寿命,单位为 s; β 为缓发中子组的总份额; λ 为等效缓发中子组的延时常数,单位为 s^{-1} ; ρ_{ext} 和 ρ_{sum} 分别为控制棒引入的反应性和总的反应性,单位为 pcm; α_F 和 α_C 分别为燃料温度和冷却剂温度反应性系数,单位为 pcm/ $^{\circ}\text{C}$; T_F 为堆芯燃料温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_{av} 为反应堆冷却剂平均温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_{F0} 、 $T_{\text{av}0}$ 分别为燃料温度、堆芯内冷却剂平均温度初始值,单位为 $^{\circ}\text{C}$; F_f 为燃料发热份额; P_0 为堆芯热功率,单位为 MW; T_{CL} 为冷线温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_{HL} 为热线温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; $T_{\theta 1}$ 为反应堆冷却剂入口温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; $T_{\theta 2}$ 为反应堆冷却剂出口温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_m 为 U 形传热管温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; Ω 为堆芯中燃料与冷却剂传热系数, Ω_p 为蒸汽发生器中冷却剂与 U 形传热管传热系数, Ω_s 为蒸汽发生器中 U 形传热管与二回路蒸汽传热系数,单位为 $\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{K})$; μ_f 、 μ_c 分别为燃料、堆芯冷

却剂比热容, μ_p 为蒸汽发生器冷却剂比热容, μ_m 为 U 形传热管比热容,单位为 kJ/K ; $M = D_{\text{sp}} C_{\text{pc}} m_{\text{Cn}}$, D_{sp} 为冷却剂主泵流量, C_{pc} 为冷却剂比热容, m_{Cn} 为额定工况下冷却剂质量流量; Q_s 为二回路蒸汽流量,单位为 kg/s ; P_s 为主蒸汽压力,单位为 MPa; h_{fw} 和 h_s 分别为二回路给水入口温度比焓、出口蒸汽比焓,单位为 kJ/kg ; K_{P_s} 为蒸汽压力时间常数; $K_{P_s-T_s}$ 为二回路主蒸汽压力与主蒸汽温度 T_s 之间的转换关系系数。

b. 基于变量偏差的微分方程。

为了方便建模,实际建模中可考虑变量变化,搭建基于变量偏差微分方程的数学模型。对于反应堆中子动态模块而言,其变量发生变化前后,有:

$$\begin{cases} \frac{dN_{r0}}{dt} = \frac{\rho_{\text{sum}0} - \beta}{l} N_{r0} + \lambda C_{r0}, \rho_{\text{sum}0} = 0, N_{r0} = 1 \text{ p.u.} \\ \frac{dC_{r0}}{dt} = \frac{\beta}{l} N_{r0} - \lambda C_{r0} \\ \frac{d(N_{r0} + \Delta N_r)}{dt} = \frac{\rho_{\text{sum}} - \beta}{l} (N_{r0} + \Delta N_r) + \lambda (C_{r0} + \Delta C_r) \\ \frac{d(C_{r0} + \Delta C_r)}{dt} = \frac{\beta}{l} (N_{r0} + \Delta N_r) - \lambda (C_{r0} + \Delta C_r) \end{cases} \quad (4)$$

其中, N_{r0} 为 N_r 的初始值(标么值); $\rho_{\text{sum}0}$ 和 C_{r0} 分别为 ρ_{sum} 和 C_r 的初始值; Δ 表示相应变量的偏差。

忽略 $(\Delta \rho_{\text{ext}} + \alpha_F \Delta T_F + \alpha_C \Delta T_{\text{av}}) \Delta N_r$, 得到含变量偏差的近似线性化方程为:

$$d\Delta N_r = \frac{\Delta \rho_{\text{ext}} + \alpha_F \Delta T_F + \alpha_C \Delta T_{\text{av}}}{s(l + l\lambda + \beta)} (s + \lambda) \quad (5)$$

其中, s 为复变量。

类似地,对其他各子模块可建立基于变量偏差的微分方程。综上,基于变量偏差的压水堆核电机组动态模型的变量初始变化为 0,因此省略了变量的初始化平衡计算,为建模和参数的影响分析提供了方便,但近似线性化反应堆中子动态模型方程、蒸汽压力方程时会带来一定的误差。

1.2 基于微分方程和传递函数挖掘参数影响

由式(1)~(3)可知:①反应堆中子动态模块的变量集为 $\{N_r, C_r, T_F, T_{\text{av}}, \rho_{\text{ext}}\}$, 其参数集为 $\{l, \beta, \lambda, \alpha_F, \alpha_C\}$; ②堆芯燃料及冷却剂温度模块的变量集为 $\{T_F, T_{\text{av}}, T_{\theta 1}, T_{\theta 2}\}$, 其参数集为 $\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$, 其中 $b_1 = P_0 F_f / \mu_f$, $b_2 = P_0 (1 - F_f) / \mu_c$, $b_3 = \Omega / \mu_f$, $b_4 = \Omega / \mu_c$, $b_5 = M / \mu_c$; ③蒸汽发生器模块的变量集为 $\{T_p, P_s, T_m, T_{\text{HL}}, T_{\text{CL}}, Q_s\}$, 其参数集为 $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6\}$, 其中 $c_1 = M / \mu_p$, $c_2 = \Omega_p / \mu_p$, $c_3 = \Omega_p / \mu_m$, $c_4 = \Omega_s / \mu_m$, $c_5 = \Omega_s$, $c_6 = (h_s - h_{\text{fw}}) G_{\text{sn}}$, G_{sn} 为额定蒸汽质量流量。

a. 基于变量偏差微分方程的参数影响分析。

由式(1)~(3)得到基于变量偏差的微分方程,令各状态变量即等号左边等于 0,可以求解得到过渡到稳态时变量与参数之间满足的关系:

$$\begin{cases} \Delta T_{av} = \frac{\Omega(\Delta T_{02} - \Delta T_{01})}{8M} + 0.5(\Delta T_{01} + \Delta T_{02}) \\ \Delta T_F = \frac{F_f P_0 \Delta N_r}{\Omega} + 0.25(\Delta T_{01} + \Delta T_{02}) + 0.5\Delta T_{av} \\ \Delta T_m = \Delta T_s + \frac{M(\Delta T_{HL} - \Delta T_{CL})}{2\Omega_s} \\ \Delta T_P = 2\Delta T_m - \Delta T_{av} + \frac{M(\Delta T_{HL} - \Delta T_{CL})}{\Omega_p} \end{cases} \quad (6)$$

b. 基于传递函数的参数影响分析。

进一步从传递函数的角度分析参数影响,解释单变量输入时输出变量的变化趋势。对于堆芯燃料及冷却剂温度模块而言,当 $\Delta T_{CL} = 0$ 时,有:

$$\Delta T_F = \frac{b_1 s + b_1(b_3 + b_5) + b_2 b_3}{s^2 + (b_2 + b_4 + b_5)s + b_2 b_5} \Delta N_r \quad (7)$$

由式(7)可知: T_F 的变化与 N_r 的变化相关,此时参数 b_4 不影响 T_F 的终值,只影响过渡过程;燃料发热份额 F_f 会同时影响 b_1, b_2 ,若将 F_f 近似为 1,这会影响变量 T_F 的初始值和过渡过程之后的终值。仿真机组从额定功率阶跃降功率至 90% 工况时的 F_f 值是否为 1 可以验证 F_f 对 T_F 的影响。

当 $\Delta N_r = 0$ 时,堆芯燃料及冷却剂温度模块有:

$$\Delta T_F = \frac{b_2 b_5}{s^2 + (b_2 + b_4 + b_5)s + b_2 b_5} \Delta T_{CL} \quad (8)$$

对于蒸汽发生器模块而言,假定 $\Delta T_s = K_2 \Delta P_s$, K_2 为比例系数。当变量 Q_s 不变时,有:

$$\begin{cases} \Delta P_s = \frac{c_1 c_3 c_5}{K_p s^3 + k_1 s^2 + k_2 s + c_1 c_3 c_5 K_2} \Delta T_{HL} \\ \Delta P_s = \frac{c_3 c_5}{K_p s^2 + [K_p(c_3 + c_4) + c_1]s + k_3} \Delta T_P \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} k_1 = K_p(c_1 + c_2 + c_3 + c_4) + c_5 K_2 \\ k_2 = K_p(c_1 c_3 + c_1 c_4 + c_2 c_4) + c_5 K_2(c_1 + c_2 + c_3) \\ k_3 = c_1(c_3 + c_4) - c_4 c_5 K_2 \end{cases} \quad (10)$$

结合式(6)~(10),分析微分方程、传递函数可确定某些输入扰动下参数对变量的影响形式,包括是否改变变量终值、过渡过程等。蒸汽发生器的设计参数如 M, Ω_s, Ω_p 会影响模型输出变量的稳态值,对这些参数进行轨迹灵敏度分析时,灵敏度最终不为 0。

2 压水堆核电机组模型参数评价方法

2.1 参数灵敏度指标

围绕参数准确性问题,轨迹灵敏度分析除了能分析参数对模型动态仿真的影响,也能为参数的可辨识难易程度提供参考,并用于参数辨识中选取需要扰动的参数。轨迹灵敏度表示为:

$$\begin{cases} \tilde{G}_k = \lim_{\Delta a_j \rightarrow 0} \frac{(Y_{1i} - Y_{2i})/y_{i0}}{2\Delta a_j/a_{j0}} \\ Y_{1i} = y_i(a_1, \dots, a_j + \Delta a_j, \dots, a_m, t) \\ Y_{2i} = y_i(a_1, \dots, a_j - \Delta a_j, \dots, a_m, t) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\tilde{G}_k$ 为时刻 t 第 k 个轨迹灵敏度; y_i 为系统中第 i 个变量的轨迹; a_j 为系统中第 j 个参数; m 为参数总数; a_{j0} 为第 j 个参数的初始值; y_{i0} 为第 i 个变量的初始值。

对于压力、温度等变量,其轨迹灵敏度为:

$$\tilde{G}_k = \lim_{\Delta a_j \rightarrow 0} \frac{Y_{1i} - Y_{2i}}{2\Delta a_j/a_{j0}} \quad (12)$$

为了比较各参数的轨迹灵敏度大小,将灵敏度的绝对值的平均值计为灵敏度指标,即:

$$A_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\tilde{G}_k| \quad (13)$$

其中, K 为轨迹灵敏度的总点数。

如果仿真总时间 T 时刻的灵敏度最终为 0,则仅需要对所获取参数进行比较校核;如果灵敏度最终不为 0,则需要重点辨识该参数以提高准确性。

2.2 基于群体最优值摄动的粒子群优化算法

针对反应堆系统模型的非线性,本文采用粒子群优化算法进行参数辨识。粒子的位置和速度需不断更新,在考虑实际优化问题时,往往需要先采用全局搜索,使算法快速收敛于某一区域,然后采用局部搜索以获得高精度的解。因此,本文引入了惯性权重的概念,修正粒子的速度更新方程^[12]。为了避免某个参数稳定在参数范围边界值而造成求解无法优化的问题,可将参数摄动思想引入参数辨识过程中。将群体最优值进行摄动为:

$$z_{besti} = z_{besti} \times (1 + h \times \text{randn}) \quad i \in [1, D] \quad (14)$$

其中, D 为参数的维数; z_{besti} 为某个特定需辨识参数; h 为摄动系数; randn 为标准正态分布函数; $z_{besti} \times h \times \text{randn}$ 为参数摄动量。

根据灵敏度分析结果,选择灵敏度大的参数摄动以提高参数辨识效率及准确性。并根据待辨识参数真实值的大小设定合适的 h ,即设置合理的参数摄动量。同时在求解过程的不同阶段逐渐减小参数扰动的个数,使得求解逐渐趋于稳定。

当辨识压水堆动态模型的某一子模块参数时,取式(15)所示准则函数作为适应度函数。

$$f = \frac{\sum_{j=1}^{m_1} \sum_{i=1}^N [y_j(i) - y_{j0}(i)]^2}{N} \quad 1 \leq m_1 \leq M_0 \quad (15)$$

其中, N 为数据总点数; m_1 为辨识选用输出变量个数; M_0 为模型输出变量个数; $y_j(i)$ 和 $y_{j0}(i)$ 分别为该子模块第 j 个输出变量第 i 个数据点的仿真结果和测试结果。式(15)也为误差评价指标 σ , 主要通过 σ 表征仿真曲线与测试曲线的吻合程度。

由式(13)、(15)可知, 参数 a_j 对应的灵敏度指标越大, 则 f 越大; 且参数 a_j 易准确获取以使 f 减小, 对 a_j 摄动在一定程度上也有利于辨识。参数摄动增加了参数的差异性和多样化, 有利于寻得最优参数。当 σ 达到很小的、接近于 0 的值时, 仿真曲线与测试曲线的吻合程度较好, 此时辨识所得模型参数更为准确。因此本文暂不考虑曲线的残差及形状指标^[19]来进一步表征模型准确度。

2.3 压水堆核电机组动态模型参数评价步骤

压水堆核电机组动态模型参数的评价流程如图 1 所示。参数评价的主要步骤如下:

- 针对压水堆核电机组动态模型, 按照内部物理边界将其分解为多个子模块模型, 明确各子模块的输入变量、中间变量、输出变量、需要获取的参数;
- 分析微分方程和传递函数, 确定参数的改变是否影响输出变量的稳态值, 以此判断参数的灵敏度最终是否为 0, 并得到影响变量稳态值的参数;
- 进行参数辨识和计算, 初步获取模型参数;
- 通过轨迹灵敏度计算得到在不同扰动大小、不同输入扰动深度或输入量下参数对输出变量影响

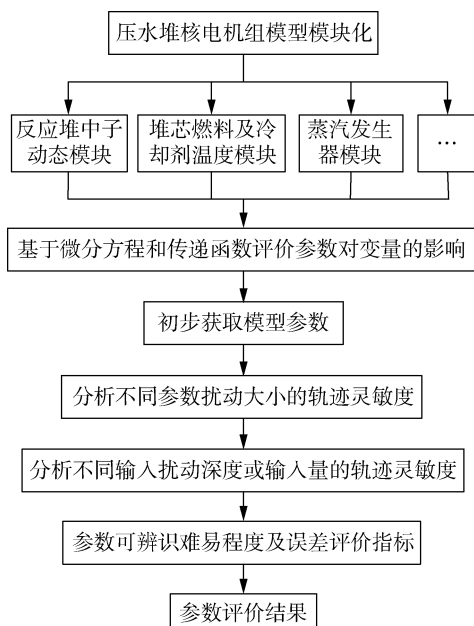


图 1 压水堆核电机组动态模型参数评价流程

Fig.1 Flowchart of evaluating parameters of pressurized water reactor nuclear power unit's dynamic model

的定量评价;

e. 由轨迹灵敏度分析结果得到参数的可辨识难易程度, 采用基于群体最优值摄动的智能算法以准确获取模型参数、提高评价参数的准确性。

3 压水堆核电机组模型参数评价验证

以压水堆一回路系统模型中的反应堆中子动态模块、堆芯燃料及冷却剂温度模块、蒸汽发生器模块为例, 说明轨迹灵敏度分析方法及压水堆核电机组动态模型参数评价方法的应用。

3.1 压水堆动态模块参数灵敏度分析

3.1.1 含一回路温度反馈的反应堆中子动态模块参数灵敏度分析

反应堆包含燃料温度和冷却剂温度反馈, 需保证总的反馈系数为负值, 才能保证反应堆具有自稳定性。将反应堆中子动态模块温度反馈简化为含一回路温度负反馈, 用一阶惯性环节表示:

$$H(s) = \frac{R_F}{T_1 s + 1} \quad (16)$$

其中, T_1 为时间常数; R_F 为温度反馈系数。

分析含一回路温度反馈的反应堆中子动态模块的传递函数可知, 在输入不变的情况下, 当改变反应堆温度反馈系数时, 压水堆堆芯中子动态模型的增益会随之变化, 即会改变模型的输出量。

初始值 $N_r = 1$ p.u., 代入典型参数后, 当输入与 β 无关, 即 ρ_{ext} 在 0 s 时刻阶跃变化 0.000 1 p.u., 使得参数 l, λ, β, R_F 变化 $\pm 10\%$ 时, 记录输出量 N_r 的轨迹变化曲线, 计算得到 l, λ, β, R_F 的轨迹灵敏度, 如图 2(a) 所示; 当输入与 β 有关, 即输入为 0.01β 时, 参数轨迹灵敏度如图 2(b) 所示。含温度反馈的反应堆中子动态模块参数轨迹灵敏度的计算结果如表 1 所示(表中 N_r 终值为标幺值)。此外, 表 1 中给出了

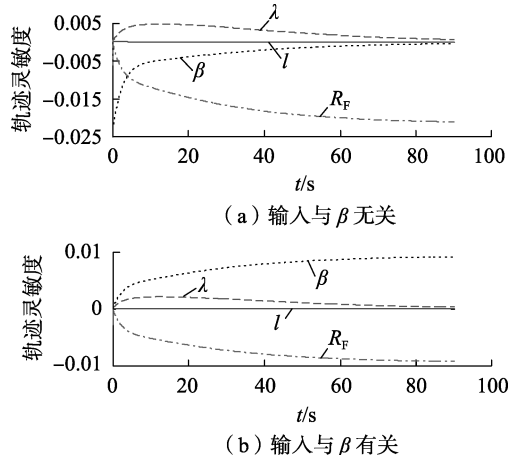


图 2 含一回路温度反馈的反应堆中子动态模块参数轨迹灵敏度

Fig.2 Parameter trajectory sensitivity of core neutron dynamic module with primary temperature feedback

表 1 含温度反馈的反应堆中子动态模块参数轨迹灵敏度比较

Table 1 Comparison of parameter trajectory sensitivity for core neutron dynamic module with temperature feedback

参数	灵敏度指标			N_r 终值	
	不含温度反馈	含一回路温度反馈 且输入与 β 无关	含一回路温度反馈 且输入与 β 有关	含一回路温度反馈 且输入与 β 无关	含一回路温度反馈 且输入与 β 有关
β	0.028 8	0.002 785	0.007 500	1.021 186 3/1.021 256 1	1.010 251 8/1.008 416 2
λ	0.004 6	0.002 707	0.001 213	1.021 275 4/1.021 141 6	1.009 360 1/1.009 299 5
l	3.556×10^{-5}	1.293×10^{-5}	1.346×10^{-5}	1.021 224 5/1.021 224 3	1.009 337 1/1.009 336 9
R_F	—	0.017 27	0.007 567	1.019 320 8/1.023 536 5	1.008 500 1/1.010 353 2

不含温度反馈,即式(1)中 $\alpha_F=0$ 、 $\alpha_C=0$ 时,参数 l 、 λ 、 β 的灵敏度分析结果。

由图 2 和表 1 可知:参数 λ 、 β 、 l 中, β 的灵敏度指标最大;当含一回路温度负反馈且输入与 β 无关时, β 和 λ 的灵敏度最终趋于 0;当输入与 β 有关时, β 与 R_F 对 N_r 的影响作用相反;当 t 略微大于 0 时,温度反馈系数 R_F 的灵敏度迅速降低为更小的负值,说明 N_r 的过渡过程及稳态值受温度反馈系数 R_F 的影响较为明显。

3.1.2 蒸汽发生器模块参数灵敏度分析

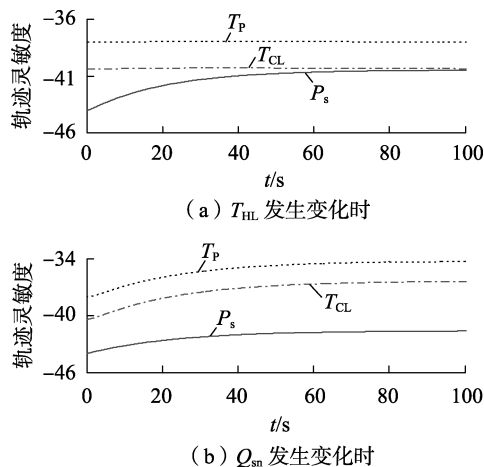
蒸汽发生器模块受蒸汽发生器结构尺寸和热工参数的影响。假定 2 种工况:① T_{HL} 从额定值向下阶跃变化 10 °C;② 蒸汽流量给定值 Q_{sn} 从额定值向下阶跃变化 0.1 p.u。2 种工况下 $c_6=G_{sn}(h_s-h_{fw})$ 变化 $\pm 10\%$ 对 T_p 、 T_{CL} 、 P_s 的影响如图 3 所示,蒸汽发生器模块参数轨迹灵敏度的计算结果如表 2 所示。由图 3 和表 2 可知,不同输入量扰动情况下,当蒸汽发生器热工参数 h_s 、 h_{fw} 等参数发生变化时,将不仅改

变 P_s 的过渡过程,也会引起 P_s 的初始值发生较大的变化。

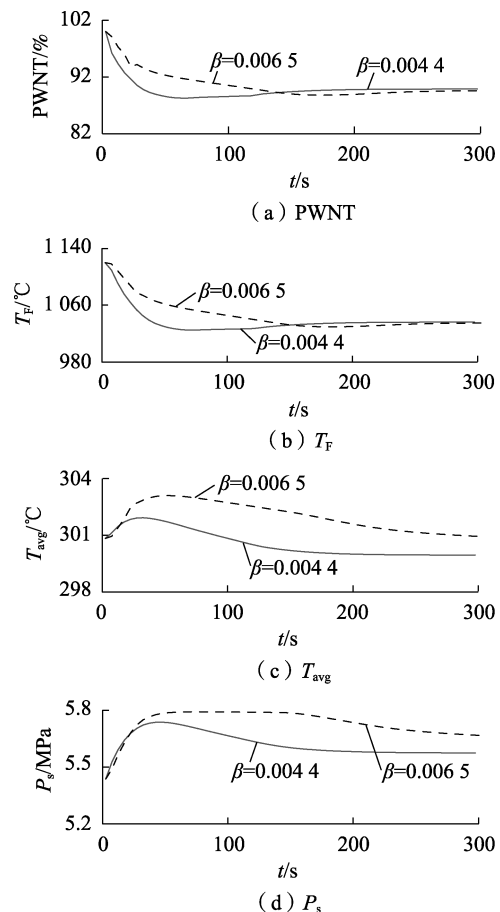
此外,对于堆芯燃料及冷却剂温度模块而言,在给定 N_r 阶跃变化或 T_{01} 阶跃变化不同输入时,参数 $b_4=\Omega/\mu_c$ 对输出变量 T_F 、 T_{av} 和 T_{02} 的灵敏度具有明显差异,给定 N_r 变化对辨识参数 b_4 是有利的。

3.1.3 PCTTRAN 软件仿真验证参数 β 的影响

不同堆型或燃料处于不同寿命周期时参数 β 略有不同,基于 3.1.1 节中参数 β 的轨迹灵敏度分析结论,1 s 时机组由额定功率阶跃降功率至 90% 的工况下, PCTTRAN 仿真软件输出如图 4 所示。图中, PWNT 近似等于 N_r 的标幺值; T_{avg} 为平均温度测量值。

图 3 蒸汽发生器模块不同输入扰动下参数 c_6 的轨迹灵敏度Fig.3 Trajectory sensitivity of parameter c_6 under different input disturbances of steam generator module表 2 2 种工况下蒸汽发生器模块参数 c_6 的轨迹灵敏度Table 2 Trajectory sensitivity of parameter c_6 for steam generator module under two working conditions

工况	轨迹灵敏度		
	c_6 对 T_p	c_6 对 T_{CL}	c_6 对 P_s
①	37.998 7	40.339 0	41.231 5
②	35.177 8	37.347 0	42.166 6

图 4 不同参数 β 下仿真结果对比Fig.4 Comparison of simulative results between different β values

分析图 4 可知,功率给定阶跃降低过程中,调门关闭,引起主蒸汽压力上升,冷线温度升高,反应堆一回路冷却剂平均温度升高,最终稳定后,反应堆功率降低到一个较低的状态,冷却剂平均温度降低,蒸汽压力稳定到一个新的值。 $\beta=0.0065$ 的工况相比于 $\beta=0.0044$ 的工况,仿真时间段内输出变量 PWRT(近似等于 N_r 的标幺值)、 T_F 、 T_{avg} 、 P_s 终值的相对误差分别为 -0.313% 、 -0.133% 、 0.325% 、 1.647% 。可见, β 影响变量的过渡过程和稳态值。

3.2 参数评价的效果分析

基于 3.1.2 节中的轨迹灵敏度分析结果,将参数 c_6 对应的粒子群优化算法的群体最优值进行参数摄动,辨识与校核参数并评价模型参数的准确性。

设定仿真工况如下:蒸汽流量给定值不变,1 s 时热线温度 T_{HL} 从额定温度向下阶跃变化 10°C 。以 T_{CL} 、 T_F 和 P_s 变量的偏差和最小作为目标函数,辨识后仿真结果对比如图 5 所示。由图 5 可知,基于辨识参数的蒸汽发生器的仿真曲线与测试曲线吻合;对于非线性多输出系统而言,以多输出变量误差和作为算法寻优的目标函数,能使辨识结果更加准确、有效。

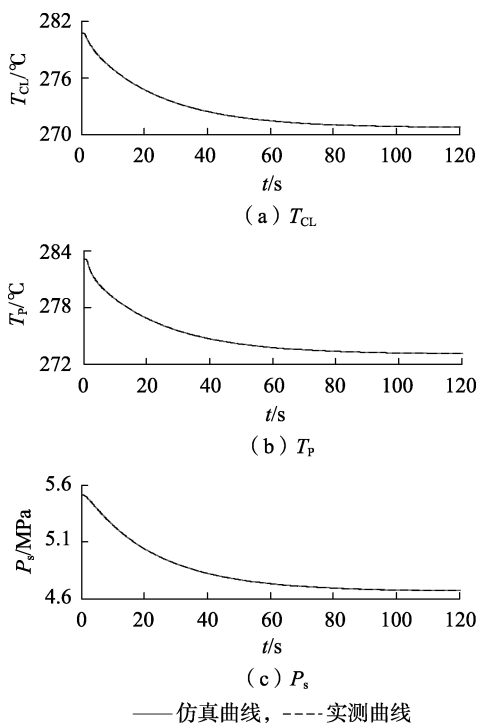


图 5 基于辨识参数的蒸汽发生器模块参数的仿真曲线

Fig.5 Simulative curves of steam generator module's parameters based on estimated parameters

综上可知,压水堆核电机组模型的反应堆温度反馈系数和蒸汽发生器的 M 、 Ω_s 、 Ω_p 等设计参数实际上改变了模型的增益,不仅会影响输出变量的动态变化过程,也会影响压水堆核电机组模型仿真输出的稳态值。

4 结论

为了更好地获取模型参数,本文基于压水堆核电机组模块化处理,采用定性定量评价相结合的方法,研究了压水堆核电机组动态模型参数的评价方法,得出主要结论如下。

a. 反应堆温度反馈系数、燃料发热份额等参数实际上改变了模型的增益,会影响模型仿真输出的稳态值,这些参数的灵敏度最终不为 0;其中,对于反应堆中子动态模块而言,应考虑缓发中子组的总份额参数 β 变化的影响。

b. 对于压水堆核电机组的多输入子模块而言,通过参数灵敏度分析,确定参数在不同工况下的可辨识难易程度,采用基于群体最优值摄动的粒子群优化算法获取模型参数,为利用实测数据获取模型的准确参数奠定了基础。

c. 针对现有反应堆模型采用设计参数影响模型输出变量稳定值的问题,可以设计基于变量偏差的压水堆核电机组动态模型,该模型为近似线性化模型,省略了变量初始稳定值平衡计算的步骤,为建模和参数的影响分析提供了方便,但反应堆中子动态方程、蒸汽压力方程的近似线性化会给模型的准确性带来一定的误差。

参考文献:

- [1] INOUE T, ICHIKAWA T, KUNDUR P, et al. Nuclear plant models for medium-to-long term power system stability studies [J]. IEEE Transactions on Power systems, 1995, 10(1): 141-148.
- [2] 张学成, 胡学浩, 周修铭, 等. 具有核电模型的中期动态模拟程序开发及大型核电站与电力系统相互影响的研究 [J]. 电网技术, 1995, 19(2): 5-10.
ZHANG Xuecheng, HU Xuehao, ZHOU Xiuming, et al. Development of midterm dynamic simulation program including nuclear power plant model and study of interaction between large nuclear power plant and power system [J]. Power System Technology, 1995, 19(2): 5-10.
- [3] 赵洁, 刘涤尘, 吴耀文. 压水堆核电厂接入电力系统建模 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 8-13.
ZHAO Jie, LIU Dichen, WU Yaowen. Modelling of pressurized water reactor nuclear power plant integrated into power system simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 8-13.
- [4] 孙文涛, 刘涤尘, 赵洁, 等. 适用于电力系统稳定分析的 AP1000 核电厂动态模型 [J]. 电网技术, 2014, 38(4): 987-993.
SUN Wentao, LIU Dichen, ZHAO Jie, et al. An AP1000 nuclear power plant dynamic model suitable for stability analysis of power grid [J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 987-993.
- [5] 吴国旻, 鞠平, 宋新立, 等. 电力系统动态仿真中 AP1000 核电机组的简化实用模型 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1657-1665.
WU Guoyang, JU Ping, SONG Xinli, et al. A simplified practical model of AP1000 nuclear power plants for power system dynamic simulations [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1657-1665.
- [6] 晁晖, 于大海, 夏潮. 核电机组原动机调节系统实测建模与仿真

- 研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 368-374.
- CHAO Hui, YU Dahai, XIA Chao. Modeling test and simulation of prime mover and governor for nuclear power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 368-374.
- [7] SAGE A P, MASTERS G W. Identification and modeling of states and parameters of nuclear reactor systems[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1967, 14(1): 279-285.
- [8] CARLOS S, GINESTAR D, MARTORELL S, SERRADELL V. Parameter estimation in thermal hydraulic models using the multidirectional search method[J]. Annals of Nuclear Energy, 2003, 30(2): 133-158.
- [9] CADINI F, ZIO E. A Monte Carlo method for the model-based estimation of nuclear reactor dynamics[J]. Annals of Nuclear Energy, 2007, 34(10): 773-781.
- [10] FAZEKAS C, SZEDERKENYI G, HANGOS K M. Identification of the primary circuit dynamics in a pressurized water nuclear power plant[C]//17th IFAC Word Congress. Seoul, Korea: [s.n.], 2008: 10640-10645.
- [11] 陈智, 张英, 王华金, 等. 岭澳核电站二期蒸汽发生器水位控制系统相关传递函数的辨识方法[J]. 核动力工程, 2011, 32(5): 29-32.
- CHEN Zhi, ZHANG Ying, WANG Huajin, et al. Identification method for transfer function of steam generator level control system of Ling'ao Phase II NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(5): 29-32.
- [12] ABDIO M A. Optimal design of power system stabilizers using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 406-413.
- [13] 崔志强, 王宁, 贾清泉, 等. 基于分层匹配追踪算法的电能质量复合扰动参数辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 153-159.
- CUI Zhiqiang, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Parameter identification based on hierarchical matching pursuit algorithm for complex power quality disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 153-159.
- [14] HSU Y Y, LIU C S, LUOR T S. Experience with the identification and tuning of excitation system parameters at the second nuclear power plant of Taiwan power company[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 747-753.
- [15] BENCHLUCH S M, CHOW J H. A trajectory sensitivity method for the identification of nonlinear excitation system models[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2): 159-164.
- [16] WANG Yinfeng, LU Chao, ZHU Lipeng, et al. Comprehensive modeling and parameter identification of wind farms based on wide-area measurement systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 383-393.
- [17] 贺仁睦, 郑晓雨, 马进, 等. 基于轨迹灵敏度的负荷参数辨识范围调整方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 17-21.
- HE Renmu, ZHENG Xiaoyu, MA Jin, et al. A method of parameter range adjustment in load parameter identification based on the trajectory sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 17-21.
- [18] 黄小庆, 阮驰骋, 邹佳芯, 等. 考虑电网特性的动态无功优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 127-133.
- HUANG Xiaoqing, RUAN Chicheng, ZOU Jiaxin, et al. Optimal dynamic var configuration considering grid characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 127-133.
- [19] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 电力系统仿真可信度评估方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 51-57.
- JIA Xudong, LI Gengyin, ZHAO Chengyong, et al. Study of the credibility evaluation method for the power system simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 51-57.

作者简介:



刘涤尘

刘涤尘(1953—),男,湖北红安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: deliu@whu.edu.cn);

王力(1990—),男,湖北仙桃人,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: 2009302540275@whu.edu.cn);

赵洁(1986—),男,湖北仙桃人,副教授,博士,通信作者,主要从事核电厂和电力系统运行与控制方面的研究(E-mail: jiezh_who@whu.edu.cn)。

Parameter evaluation of pressurized water reactor nuclear power unit's dynamic model

LIU Dichen¹, WANG Li^{1,2}, ZHAO Jie¹, ZHANG Shengfeng¹, WU Guoyang³, WANG Jun¹, SHAO Youguo¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The stability and correctness of the parameters in the dynamic model of PWR(Pressurized Water Reactor) nuclear power unit are of great significance to ensure the transient stability of the system, so it is necessary to design a suitable parameter evaluation method. The dynamic model of PWR nuclear power unit is divided into multiple sub-module models according to its internal physical boundaries. According to the derivation for the differential equation mathematical model of each sub-module, the influence of the parameter variation on the steady-state output variables of each sub-module are estimated qualitatively based on the transfer function of variable deviation. In order to improve the efficiency and accuracy of parameter obtainment, a reasonable parameter acquisition scheme is chosen based on the determination of the sensitivity index value and whether the final value of the parameter sensitivity is zero. Particle swarm optimization algorithm based on the perturbation of the group optimal value is applied to obtain the model parameters, and the results of the example verify the effectiveness of the proposed parameter evaluation method.

Key words: pressurized water reactor nuclear power unit; dynamic model; sensitivity; particle swarm optimization algorithm; parameter evaluation