

蒸汽发生器水位双 PI 控制的改进研究

李凤宇¹, 陆古兵¹, 张龙飞¹, 刘东²

(1. 海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军 91404 部队装备部, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 蒸汽发生器 (SG) 水位的控制问题是压水堆核电站紧急停堆的 1 个重要原因, 尤其在低功率情况下, 缩胀效应致使水位控制较难。为了避开水位变化初期的假水位的影响, 在控制过程中加入判别器来决定水位信号是否参与控制。采用遗传算法对控制器参数进行整定, 采用的 SG 水位模型是简化的数学模型。对控制器中有无判别器的控制效果进行了对比。对比结果表明: 加入判别器后, 缩短了调节时间, 降低了超调量。

关键词: 蒸汽发生器; 遗传算法; 水位控制

中图分类号: TL361 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0279-04

Improved Double PI Control for Nuclear Steam Generator Water Level

LI Feng-yu¹, LU Gu-bing¹, ZHANG Long-fei¹, LIU Dong²

(1. College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Weaponry Division, Navy 91404 Troop, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Malfunction of steam generator water level control is the main cause of unexpected shutdowns in nuclear power plants. Particularly at low powers, it is a difficult task due to shrink and swell phenomena. In order to avoid the affect caused by spurious water level, a special discriminator was designed. Parameters of the controller with a simplified steam generator model were tuned offline by the genetic algorithm. Control effect with a discriminator was contrasted to that without a discriminator. The results show that the discriminator shortens control period and reduced overshoot.

Key words: steam generator; genetic algorithm; level control

蒸汽发生器 (SG) 是压水堆的关键动力设备。一回路的冷却剂在堆芯内被加热, SG 将一回路的冷却剂热量传递给二回路, 产生蒸汽推动汽轮机发电。在运行过程中, SG 水位低将引起蒸汽进入给水环, 使管束传热恶化, 或引起 SG 的管板热冲击。水位过高, 将会影响汽水分离效果, 造成进入汽轮机的饱和蒸汽干度不符合要求, 危害汽轮机的叶片。因此, SG 水位须严格控制一定范围内。根据有关统计, 低功率情况下 SG 水位的控制问题导致了压水堆核

电站 25% 的紧急停堆^[1]。

1 SG 水位控制的机理与模型

U 型管 SG 的水位控制难点在于其是一开环不稳定系统, 是复杂的非线性动力学对象。在蒸汽负荷流量扰动、给水流量扰动下, SG 内介质体积存在“膨胀”、“收缩”效应。

在 SG 给水量不变的情况下, 突然增加蒸汽流量。根据质量平衡关系, 水位应下降, 但实际水位初期变化是上升的。原因是: 蒸汽流

量增加时,汽相压力降低,SG内的蒸发量增加,气泡增多,使SG内汽水混合物体积增加,致使水位上升。

在蒸汽流量不变的情况下,突然增加给水流量。从物质总量角度看,水位应上升,但实际水位是下降的。原因是:由于给水温度比SG内饱和水温度低,给水进入后要吸收热量,SG内汽水混合物体积减小,导致水位下降。

这种水位变化初期的反常现象称为“虚假水位”现象,在低功率、大扰动情况下表现得更加显著。虚假水位是影响调节品质的重要因素,使控制器产生错觉,导致给水阀门动作方向与要求方向相反,加剧了蒸汽流量与给水流量间的质量不平衡,水位波动范围加大,调节时间拉长。

基于热工水力试验或质能守恒方程可开发供训练和事故分析的仿真机^[2]。但对于设计SG水位控制器,这些模型均过于复杂。本文采用广泛使用的U型管SG水位模型来研究水位控制,该模型是一四阶的传递函数^[3-5]:

$$H(s) = \frac{G_1}{s} [Q_w(s) - Q_s(s)] - \frac{G_2}{1 + \tau_2 s} [Q_w(s) - Q_s(s)] + \frac{G_3 s}{\tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2} + 2\tau_1^{-1} s + s^2} Q_w(s) = G_w(s) Q_w(s) - G_s(s) Q_s(s) \quad (1)$$

其中: $H(s)$ 为SG水位; $Q_w(s)$ 为给水流量; $Q_s(s)$ 为蒸汽流量; s 为Laplace变量; τ_1 、 τ_2 为阻尼时间常数; G_1/s 为SG内介质质量流量对水位的影响,通过积分得以体现。 G_1 是与负荷无关的常数, $G_1 = 0.058 \text{ mm/kg}$; $-G_2/(1 + \tau_2 s)$ 反映了由于“缩胀”现象引起的热力学效应,滞后时间 τ_2 取决于给水的欠热度;第3项反映了注入给水引起的机械振荡, T 为振荡周期。各参数值列于表1。

图1示出蒸汽流量扰动下、给水流量扰动下水位的响应。可看出,功率越低,虚假水位现象越显著。

表1 不同功率下SG线性模型的参数值

Table 1 Parameters of steam generator linear model at several powers

功率水平/%	$G_2/(\text{mm}\cdot\text{kg}^{-1})$	$G_3/(\text{mm}\cdot\text{kg}^{-1})$	τ_1/s	τ_2/s	T/s	$Q_s/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
5	9.63	0.181	41.9	48.4	119.6	57.4
15	4.46	0.226	26.3	21.5	60.5	180.8
30	1.83	0.310	43.4	4.5	17.7	381.8
50	1.05	0.215	34.8	3.6	14.2	660
100	0.47	0.105	28.6	3.4	11.7	1435

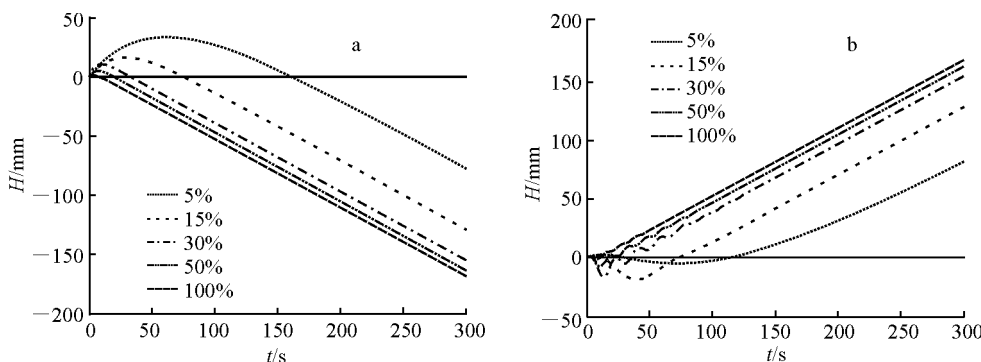


图1 蒸汽流量(a)和给水流量(b)分别增加0.7%的扰动下的水位变化

Fig. 1 Response of water level to 0.7% step on steam flow (a) and feedwater flow (b)

2 控制器结构设计

蒸汽流量与给水流量间的差异是系统的主要扰动，特别是蒸汽流量的变化严重影响系统的安全和稳定。采用图 2 所示方法对 SG 水位进行控制。当蒸汽负荷发生变化时，应首先使蒸汽流量与给水流量快速达到基本平衡，使系统基本稳定。即当蒸汽流量与给水流量相差较大时，控制器 PI_a 用于对蒸汽流量扰动进行前馈补偿，水位信号不作为控制器的输入信号，从而避开假水位信号。当系统基本稳定，蒸汽流量与给水流量相差较小时，水位信号重新参与控制，控制器 PI_b 用于缩小水位的波动范围，当系统基本处于稳定状态时，控制器 PI_b 起主导作用。图 2 中判别器进行负荷是否变化的判别与系统是否基本稳定的判别。负荷是否变化的判别依据为：

$$|Q_s(t_n) - Q_s(t_{n-1})| \geq a_1$$

式中： $Q_s(t_n)$ 为当前时刻的蒸汽流量； $Q_s(t_{n-1})$ 为上一时刻的蒸汽流量。

系统是否基本稳定的判别依据为：
 $|Q_s(t_n) - Q_s(t_{n-1})| < a_1$ 且 $|Q_w(t_n) - Q_s(t_n)| \leq a_2$ ，
 $Q_w(t_n)$ 为当前时刻的给水流量。

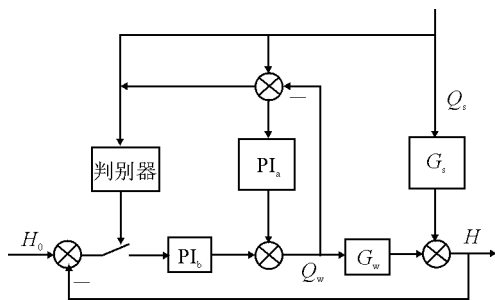


图 2 PI 控制结构图
 Fig. 2 Structure of PI controller

3 基于遗传算法的参数整定

控制结构确定后，需确定两个 PI 控制器的参数 k_{pa} 、 k_{pb} 、 k_{ia} 、 k_{ib} 及参数 a_1 、 a_2 。本文采用遗传算法来进行整定，整定过程如下。

1) 编码方式。 k_{pa} 、 k_{pb} 、 k_{ia} 、 k_{ib} 的取值范围定为 $[0, 1024]$ ， a_1 、 a_2 取值范围定为 $[0, 5\%]$ ，将 $[0, 1024]$ 、 $[0, 5\%]$ 分成 4096 个均等的区域，用 12 位二进制编码串分别对应这 4096 个区

域，每位二进制编码为 1 个基因。

2) 设计适应值函数为：

$$E_i = 1 / \int_0^T |H_d(t) - H(t)| dt$$

其中： $H_d(t)$ 为水位阶跃输入信号； $H(t)$ 为水位响应； T 为训练时间， $T=100$ s。

3) 随机产生初始种群 $X(0) = (X_1(0), X_2(0), \dots, X_n(0))$ ，种群大小 n 为 35， $X_j(0) = \text{rand}(k_{pa}, k_{pb}, k_{ia}, k_{ib}, a_1, a_2)$ ， $j=1, 2, \dots, 30$ 。

4) 使用比例选择算子进行选择^[6]。计算适应值 $E(X_j)$ ，将 $\max E(X_{j2})$ 对应的母体 X_{j1} 替换 $\min E(X_{j1})$ 对应的母体 X_{j2} 。

5) 采用单点交叉算子进行杂交。独立地对 n 个母体进行交叉配对 (X_{j1}, X_{j2}) ，等概率地随机确定 1 个基因位置作为交叉点，将每对母体的两个个体从交叉点分成前后两部分，交换两个个体的后半部分得到两个新个体。

6) 利用基本位变异算子实现后代变异，变异概率 0.10。独立对 n 个交叉后的个体进行变异，得到下一代种群： $X(k+1) = (X_1(k+1), X_2(k+1), \dots, X_n(k+1))$ 。达到进化代数后，从种群中选出适应值最大的个体， $X_j = (k_{pa}, k_{pb}, k_{ia}, k_{ib}, a_1, a_2)$ 作为控制器参数整定结果。进化代数为 90。

反应堆功率为 5% 时， $k_{pb}=216.57$ ， $k_{ib}=8.52$ ， $k_{pa}=305.77$ ， $k_{ia}=86.65$ ，采样周期为 1 s 时， $a_1=0.547\%$ 、 $a_2=1.069\%$ 。当反应堆功率为 15% 时， $k_{pb}=167.26$ ， $k_{ib}=9.64$ ， $k_{pa}=373.18$ ， $k_{ia}=63.82$ ，采样周期为 1 s 时， $a_1=0.372\%$ 、 $a_2=0.836\%$ 。

4 小结

当反应堆功率为 5% 时，让蒸汽负荷发生 8.1% 的正阶跃。在这样的强扰动下，水位变化如图 3 所示，初始平衡时的水位定标为 0。无图 2 中所示的判别器时，仅对双 PI 控制器进行整定，从图 3 可看出，超调量约为 370 mm，调节时间约为 600 s。按图 3 所示加上判别器，对双 PI 控制器与判别器参数进行整定，水位响应的超调量约为 120 mm，调节时间约为 400 s，明显优于无判别器的控制方式。

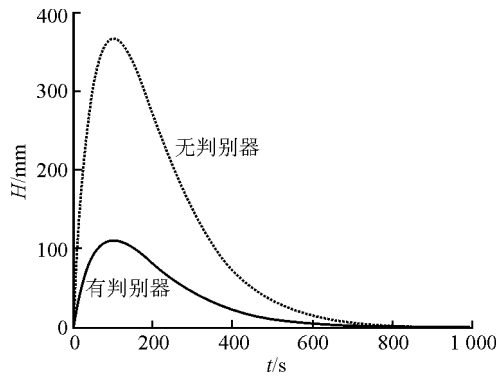


图3 蒸汽负荷突变8.1%时的水位变化

Fig. 3 Variation of water level with 8.1% steam flowrate disturbance

因此,在假水位期间,断开水位信号,使其不参与误差信号的计算,可以较好地避开假水位的影响。

参考文献:

- [1] PARLOS A G, RAIS O T. Nonlinear control of U-tube steam generators via H_{∞} control[J]. Control Engineering Practice, 2000, 29(8): 921-936.
- [2] 朱隆新. 核动力装置动力学[M]. 武汉: 海军工程学院出版社, 1989: 185-196.
- [3] HABIBIYAN H, SETAYESHI S, ARAB-ALIBEIK H. A fuzzy gain scheduled neural controller for nuclear steam generators[J]. Annals of Nuclear Energy, 2004, 31(15): 1 765-1 781.
- [4] IRVING E, MIOSSEC C, TASSART J. Towards efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive control [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations. London: British Nuclear Energy Society, 1980: 309-329.
- [5] MYUNG-KI K, MYOUNG H S, MYUNG J C. A gain-scheduled L2 control to nuclear steam generator water level[J]. Annals of Nuclear Energy, 1999, 26(7): 905-916.
- [6] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 13-33.