

基于 GMDH 建模的蒸汽发生器水位重构

袁 灿¹, 蔡 琦¹, 段孟强², 赵宇光¹, 王贵利³

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033;

2. 海军驻 431 厂军事代表室, 辽宁 葫芦岛 125001; 3. 92330 部队, 山东 青岛 216000)

摘要:蒸汽发生器水位指示仪表出现虚假指示或丧失指示的情况时有发生,而目前又没有很好的方法实现蒸汽发生器水位的重新标定,主要靠经验来进行判断,所以当事故或故障发生时严重影响操纵员对核动力装置运行情况的判断。自组织理论模型(GMDH)是建立复杂非线性大系统数学模型十分灵活而通用的方法,在处理复杂非线性对象中能得到很好的效果。本文以主蒸汽管道破口事故下重构蒸汽发生器水位为例,提出了用 GMDH 重构蒸汽发生器水位的方法,并与仿真结果进行对比。结果表明,GMDH对蒸汽发生器水位重构的相对误差小、精度高,满足实际需要,能为船用核动力装置的安全运行做出指导。

关键词:GMDH;蒸汽发生器水位;重构

中图分类号:TL364.9

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2013)10-1812-05

doi:10.7538/yzk.2013.47.10.1812

Water Level Reconstruction of Steam Generator Based on GMDH

YUAN Can¹, CAI Qi¹, DUAN Meng-qiang², ZHAO Yu-guang¹, WANG Gui-li³

(1. *Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;*

2. *Nave Equipment Division Representative Office in 431 Factory, Huludao 125001, China;*

3. *Army 92330, Qingdao 216000, China*)

Abstract: Falsehood or forfeiture occurs frequently on the water level indicating meters of the steam generator, and there is no appropriate way that can precisely identify the water level but through the experience of the operator on that condition, which grievously affects the judgment of the operator on operation state of the nuclear power plant. GMDH is a flexible and normally used method to establish complicated non-linear large system mathematics model, which makes good effects when dealing with non-linear objects. A method reconstructing the water level of steam generator with GMDH in the circumstance that the crevasse of primary stream pipeline appeared was described. In comparison with the emulation results, it shows that GMDH can reconstruct the water level of steam generator accurately. The outcome can meet the practical needs and give guidance on the safe operation of the marine nuclear power plant.

Key words: GMDH; water level of steam generator; reconstruction

蒸汽发生器是核动力系统一、二回路的枢纽,它将反应堆产生的热量传送给二回路,产生蒸汽驱动汽轮机发电。它既是一回路设备,又是二回路设备,既承受一回路工作条件(高温、高压、放射性等),又承受二回路工作条件(水质、腐蚀等),因此带来了运行和安全的复杂性^[1]。

蒸汽发生器水位是蒸汽发生器中的重要参数,也是反应堆系统中非常重要的参数,能体现反应堆运行的安全性。蒸汽发生器水位过高,会有淹没干燥器的危险,造成出口蒸汽含量超标,加剧汽轮机的冲蚀现象,腐蚀二回路的各设备,使机组损坏,甚至引发更大的事故,影响机组的寿命,同时蒸汽发生器水位过高使蒸汽发生器内水装量增加,在蒸汽管道破裂的事故工况下,对堆芯产生过大的冷却而导致反应性事故的发生。如果破裂事故发生在安全壳内,大量的蒸汽将会导致安全壳的压力、温度快速上升,危及安全壳的密封性;水位如果过低,将会导致 U 型管顶部裸露,引起管束传热恶化,造成管板热冲击,甚至可能引起蒸汽进入给水环,导致给水管线出现水锤现象^[2-3]。蒸汽发生器水位指示仪表出现虚假指示或丧失指示的情况时有发生,影响操纵员对核动力装置运行情况的判断,因此在蒸汽发生器水位丧失情况下对其进行重构是非常必要的,也是非常有意义的。

1 GMDH 原理

20 世纪 60 年代出现了一种使计算机具备自学习、自组织能力的程序设计法——试探自组织法。随之,在 60 年代末由伊凡年科提出了借助试探自组织原理,建立复杂系统数学模型的有

效方法——数据处理的群集方法(GMDH)。

该模型方法原理^[4]如下。

设系统 S 有 m 个输入变量 $x_i (i=1,2,\dots,m)$,有 1 个(或多个)输出变量 y 。

非线性函数 $y=f(x_1,x_2,\dots,x_m)$ 一般可展成离散型 Volterra 多项式级数:

$$y = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_i \sum_j a_{ij} x_i x_j + \sum_i \sum_j \sum_k a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (1)$$

式(1)的项数随输入变量增多而逐渐增加,以致达到很大的数量,因此导致建模过程中系数估计所需的样本量上升而造成计算不稳定,为此可借助生物演化中“生存竞争、自然选择”原理,采用按预定阈值进行选择或控制自发过程以获得整体效应。具体地,首先以对于外部环境的适应性为基准的试探标准,从中选择出最优组合;照此循环,便形成一种多层结构,其中每层包括生成的部分描述式和选择过程;最终自动构成与外部环境相适应的系统,即所谓完全描述式。

显然,GMDH 建模方法本质上就是试探自组织算法,其整个组织过程为:引入试探标准→有效利用累积的整体效应→控制过程的方向→选择有用信息→过滤或淘汰无用信息→引向预期结果。其基本结构如图 1 所示,算法的流程图如图 2 所示。

2 蒸汽发生器水位仿真与重构

2.1 主蒸汽管道破口时蒸汽发生器水位仿真

用热工水力分析程序 Relap5/mod3 仿真模拟主蒸汽管道 20 mm 破口的事故工况,输出

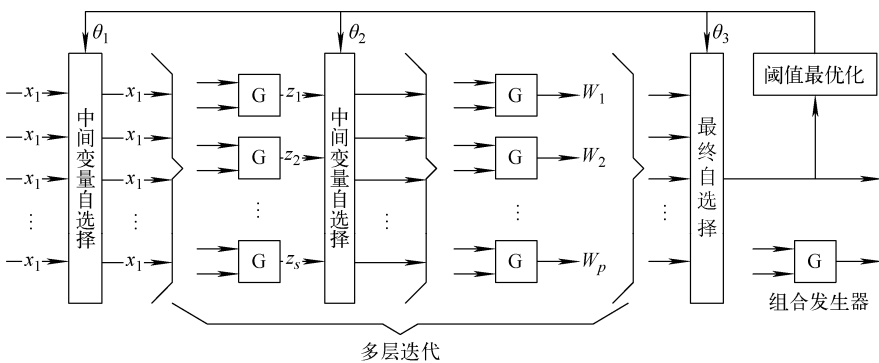


图 1 GMDH 的基本结构
Fig. 1 Basic structure of GMDH

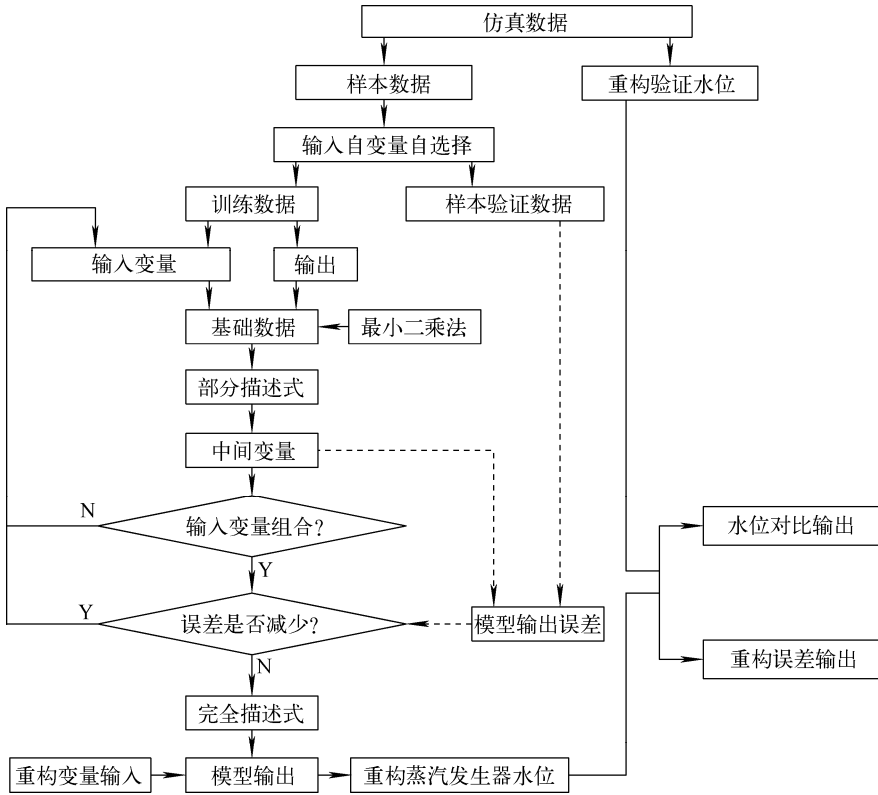


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm

蒸汽发生器水位的变化情况,并以此为基准数据实现基于 GMDH 的蒸汽发生器水位重构^[5]。仿真模拟的初始值为 30% 额定功率下的设计值,控制体划分如图 3 所示;事故发生时刻为零时刻;当主管道破口出现破口时,由于蒸汽流量突然增大,蒸汽发生器水位迅速下降,随

给水流量的自动调节,蒸汽发生器水位开始恢复,最后趋于稳定。蒸汽发生器水位仿真结果如图 4 所示。

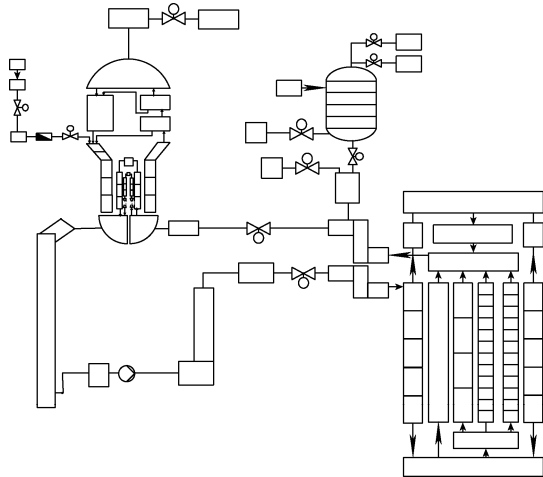


图 3 部分控制体划分

Fig. 3 Part of control component compartmentalization

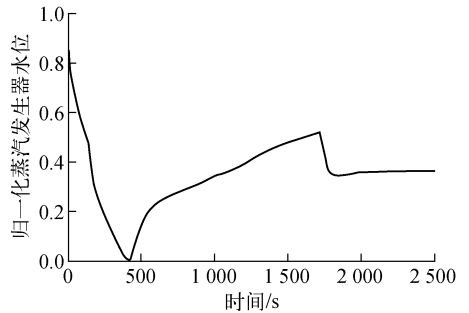


图 4 主蒸汽管道 20 mm 破口时蒸汽发生器水位仿真
Fig. 4 Simulation of water level of steam generator while crevasse of primary stream pipeline

2.2 蒸汽发生器水位重构

应用 GMDH 对蒸汽发生器水位重构的核心是将蒸汽发生器水位的影响及变化参数提取后体现在 GMDH 网络结构中,借此来实现重构的目的。重构的主题思想是选择仿真运行的

前 1 200 个数据为基准数据,以此为训练数据和样本验证数据,不断地训练验证,最终得到 GMDH;再以仿真的后 1 154 个数据为模型验证数据,实现蒸汽发生器水位的重构。

重构就是利用历史数据作为系统的训练样本,得到其内在的隐含关系,根据这个关系以及发展过程中的影响参数来进行的一种预测方法。无论何种数据均存在一定的线性或非线性关系,而任何一种轨迹关系均可由如下多项式^[4]来表示:

$$y(n) = a_0 + \sum_{m_1=0}^q a_1(m_1)x(n-m_1) + \sum_{m_1=0}^q \sum_{m_2=0}^q a_2(m_1, m_2)x(n-m_1)x(n-m_2) + \dots + \sum_{m_1=0}^q \sum_{m_2=0}^q \dots \sum_{m_p=0}^q (a_p(m_1, m_2, \dots, m_p) \cdot x(n-m_1)x(n-m_2)\dots x(n-m_p)) \quad (2)$$

式中: $a_0, a_1(\cdot), \dots, a_p(\cdot)$ 为系数; m_1, m_2, \dots, m_p 为变量的阶数; $x(\cdot)$ 为自变量; $y(\cdot)$ 为因变量。

由此可知,只要有足够的输入变量和相应的计算量即可通过拟合方法得到轨迹表达式。但蒸汽发生器水位是根据 5 个主要影响因素进行重新标定的,是 1 个高维空间系统,如果直接拟合式(2)来建立模型,需大量的历史数据和运算量,在一定条件下实施起来较困难。但 GMDH 可将单一多项式的拟合分解为多个拟合单元,并以网状递进的方式排列和连接这些单元,构成 GMDH 网络结构(图 5),来完成对复杂系统的建模。由于与一般神经网络相比, GMDH 与人脑的运行机制更为接近,且建模中采用 AICA 准则,逐层剔除多项式的弱贡献项,从而可能用较少的数据达到成功建模的目的。其基本处理单元如图 6 所示。

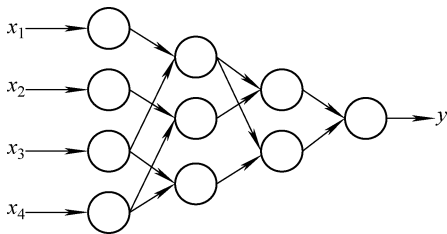


图 5 GMDH 网络结构

Fig. 5 Network structure of GMDH

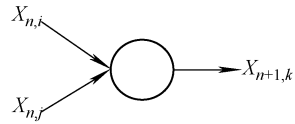


图 6 GMDH 基本处理单元

Fig. 6 Basic processing unit of GMDH

这是一种双输入-单输出的结构,其输入与输出的关系为:

$$X_{n+1,k} = a + bX_{n,i} + cX_{n,j} + dX_{n,i}^2 + fX_{n,i}X_{n,j} \quad (3)$$

利用 GMDH 网络的建模重构蒸汽发生器水位的步骤如下。

1) 提取基本单元。在总数为 n 的数据样本中取出 n_1 个样本作为训练样本(取 $n_1 = \frac{1}{2}n$),在这些样本的 m 个变量中任取两个 $x_i, x_j (i, j = 1, 2, \dots, m; i \neq j)$,以 Y 为输出,用最小二乘法建立如式(3)的处理单元,于是得到 $\frac{m(m-1)}{2}$ 个基本单元。

本文利用 Relap5 仿真模拟得到的 3 000 个蒸汽发生器水位数据作为数据的总样本,以前面得到的 1 200 个数据为训练数据,根据影响蒸汽发生器水位的主要因素(一回路平均温度、蒸汽流量、蒸汽发生器二次侧压力、蒸汽发生器给水流量和给水温度)可知输入变量为 5 个。

2) 建立输入层。先设定 1 个阈值 E_g (在此将 E_g 设为当前所有单元输出方差的均值),将其余样本 n_2 作为校核样本,将 n_2 中对应于建模样本 n_1 的相应变量值分别代入上述处理单元,算出处理单元的输出与实际输出的方差 E ,再将各单元的方差与 E_g 比较,保留低于阈值的单元(设共 u_1 个单元),记录这些单元中的最小方差 $E_m^{(1)}$ 。这样,便得到输入层的单元。应用于蒸汽发生器水位重构时将 1 200 个数据中的前 800 个作为训练样本,后 400 个作为训练验证数据,不断重复训练模型。

3) 构建中间层。将全部数据中的相应变量代入输入层单元进行计算,得到输入层的 $Y^{(1)}(u) (u=1, 2, \dots, u_1)$ 。将 $Y^{(1)}(u)$ 当作第 2 层的输入,重复上述两步,可得到第 2 层处理单元 u_2 个,第 2 层的输出 $Y^{(2)}(u) (u=1, 2, \dots, u_2)$,以及第 2 层的最小方差 $E_m^{(2)}$ 。若 $E_m^{(1)} <$

$E_m^{(2)}$, 则第 2 层构建成功, 便可同样继续构建下一层。

4) 建立输出层。设进行到第 $k+1$ 层时, 发现该层的最小方差 $E_m^{(k+1)} > E_m^{(k)}$, 则终止建模, 并将第 k 层中方差最小的单元作为输出单元。最后, 将与输出单元相关的上层单元逐层连接。至此, 便得到以样本为基础的 GMDH 网络模型。

5) 于是, 便可将这些空间变量输入 GMDH 网络进行建模, 且经建模后的 GMDH 就能输入样本, 进行蒸汽发生器水位重构。

将建立好的 GMDH 输入用于验证蒸汽发生器水位重构仿真的后 1 154 个数据, 输出重新标定的蒸汽发生器水位, 同时输出其对比结果和相对误差。

2.3 重构结果对比与分析

以影响蒸汽发生器水位的 5 个主要因素为输入变量(假设给水温度不变), 以蒸汽发生器水位为输出变量, 应用基于 GMDH 建模的方法对蒸汽发生器水位进行重新标定, 可得到表 1 所列的与仿真水位的对比结果(数据除时间和相对误差外均作相对归一化处理)。

表 1 主蒸汽管道破口时蒸汽发生器水位重构

Table 1 Reconstruction of water level in steam generator while crevasse of primary stream pipeline

时间/s	给水流量	蒸汽流量	一回路平均温度	蒸汽发生器压力	蒸汽发生器仿真水位	重构水位	相对误差/%
1 250	0.194 4	0.156 6	0.173 9	0.216	0.875	0.875	0
1 500	0.150 8	0.168 1	0.169 3	0.180 3	0.974 1	0.976 9	0.287 4
1 600	0.150 8	0.164 3	0.159 4	0.168	0.851 9	0.85	-0.211 3
1 751	0.151 9	0.154 8	0.141	0.157 9	0.667 6	0.666 7	-0.134 8
2 000	0.298 7	0.108 4	0.084 3	0.095 8	0.687	0.690 7	0.538 8

3 结论

本文用 Relap5/mod3.2 对当量直径为 20 mm 的主蒸汽管道破裂进行了模拟仿真, 并以模拟仿真的数据作为基准数据应用 GMDH 建模的方法重构蒸汽发生器水位, 通过对比验证, 结果如下。

1) GMDH 给复杂系统非线性系统问题建模创造了强有力的方法论。建模中无需大批量的训练数据即可根据系统少量数据自动估计模型的输入、结构及参数。

2) 应用 GMDH 对蒸汽发生器水位进行重构的效果很好, 其相对误差小、精度高, 可为操纵员判断核动力装置运行的安全运行情况做出指导, 保障核动力装置的安全运行。

3) 将 GMDH 引入解决核反应堆中出现的相对较难判断的丧失参数指示或虚假指示的故障诊断中, 为核动力系统故障诊断引入了新的方法, 为操纵员判断事故的真伪和对事故的预判提供一定的数据支撑, 为核动力装置故障诊断提供更快捷、有效的方法。

参考文献:

- [1] 《蒸汽发生器》编写组. 蒸汽发生器[M]. 北京: 原子能出版社, 1982.
- [2] 孙中宁. 核动力设备[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004.
- [3] 丁训慎. 压水堆核电厂蒸汽发生器的水锤事故及其防止措施[J]. 核动力运行研究, 1991, 4(1): 36-41.
DING Xunshen. Pressurized water reactor nuclear power plant water hammer accident of steam generator and its prevention measures[J]. Nuclear Power Operation Research, 1991, 4(1): 36-41 (in Chinese).
- [4] 刘兴堂, 梁炳成, 刘力, 等. 复杂系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 261.
- [5] 于雷, 蔡志明, 王少明. 船用反应堆堆芯稳态热工水利分析程序研制[J]. 海军工程大学学报, 2000, 9(5): 30-32.
YU Lei, CAI Zhiming, WANG Shaoming. The development of steady-state analysis code for marine nuclear reactor[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000, 9(5): 30-32(in Chinese).