

水汽化学故障诊断系统设计与开发^①

Development of Water and Steam Chemical Fault Diagnostic System

孙夫雄¹ 陈新¹ 葛磊² 盛凯² (1.中南财经政法大学 信息学院 湖北 武汉 430060;

2.武汉大学 动力与机械学院 湖北 武汉 430072)

摘要: 对于火电厂水汽循环系统而言,水汽品质是直接关系到整个机组的安全稳定运行的重中之重。根据水汽化学故障诊断的特点,综合运用专家系统、贝叶斯网络及灰色系统等理论和技术,研究和开发水汽化学故障诊断系统。

关键词: 化学故障诊断 专家系统 贝叶斯网络 灰色系统

1 引言

对于火电厂水汽循环系统而言,水汽品质及其运行工况的正常与否直接关系到整个火电机组安全、稳定和经济的运行^[1]。因此实时监测火电机组运行时系统的各种水汽参数,并根据水汽参数的异常变化进行故障诊断与预测,是火电机组运行中十分重要的问题。但是水汽系统中的各种水汽状态之间相互紧密地联接在一起,各种水汽化学指标之间具有延续性、传递性以及同步关联性,任意环节水汽的变化都会引起连锁反应,因此化学诊断十分复杂。

水汽内的杂质对热力设备的危害是一个渐变和积累的过程,水汽品质的恶化则会在表征各种化学指标的监测值上体现出异常,因此机组事故的发生并不是无法预判和避免的^[2]。本文依据水汽化学故障诊断的特点,研究专家系统、贝叶斯网络、灰色系统等理论及技术,开发与设计智能的水汽化学故障诊断系统。

2 研究背景

火力发电厂热力循环系统水气品质的特殊性和重要性,早在20世纪80年代国内外专家就已经讨论过实现水汽故障在线诊断的可能性和紧迫性。我国对电站故障诊断技术的研究也十分重视,曾将相关项目作为“七五”和“八五”攻关项目。虽然水汽化学故障诊断技术在判断热力系统的化学故障中已然发挥了一

定的作用,但目前我国对水汽故障的诊断仍不够深入,应用水平较低。

目前火电厂广泛实现了基于PLC系统的化学水汽过程监测、加药自动控制的集散式监控系统(如iFix监控系统),但普遍存在重监测而轻诊断的问题,诊断系统较简单,虽能及时发现单元水汽质量异常,但是缺乏整体综合分析,提出解决处理方法的能力以及对长期、大量数据作定期、全面分析诊断的能力。因此,研究开发一套亚临界机组水汽化学过程故障诊断系统,不仅有现实意义而且具有理论价值。

3 水汽化学诊断技术研究

在故障诊断领域,专家系统作为基于符号的推理系统是一种有效的方法,它是一种具有大量专门知识,并能运用这些知识解决特定领域中实际问题的计算机程序系统^[3]。虽然专家系统的理论和应用取得了重大进展,但由于其立足的符号信息处理机制的固有缺陷而导致传统专家系统存在许多问题,主要有:知识获取的瓶颈问题、知识脆弱性、自学习能力差、推理效率低和推理单调性等。

鉴于此,本文研究利用贝叶斯网络、灰色系统等智能技术与专家系统相配合,用灰色系统理论解决专家系统知识获取困难的问题,而用贝叶斯网络解决专家系统推理能力差的问题,同时专家系统也弥补了贝

^① 基金项目:中南财经政法大学研究生培养创新项目(90508008112)

收稿时间:2009-02-26

叶斯网络训练样本获取困难、推理过程透明性差等缺点。本文开发的诊断系统体系如图 1 所示。

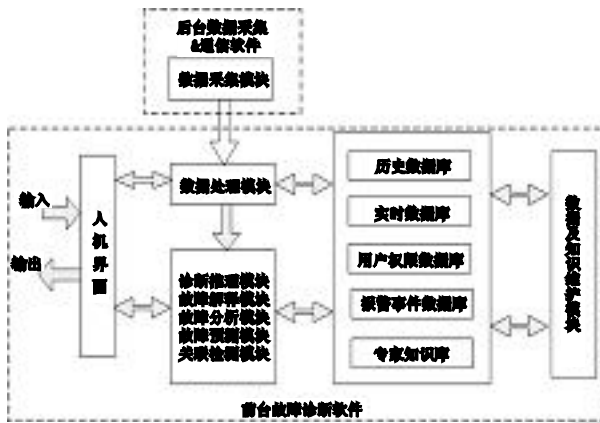


图 1 系统体系结构

图 1 中历史/实时数据来之 PLC 监控系统的历史/实时数据库，数据经过分类加工、处理，包括进行数据维数的压缩、形式转换、模型转换等，去掉冗余信息，提取出特征信息，形成模式库。其中诊断推理模块和关联检测模块是系统的核心模块，综合运用了专家系统、贝叶斯网络及灰色系统等理论和技术。

3.1 贝叶斯诊断网络

贝叶斯网络是一种基于网络结构的有向图解描述，是人工智能、概率理论、图论、决策分析相结合的产物，适用于表达和分析不确定性和概率性的事物，应用于有条件地依赖多种控制因素的决策，可以从不完全、不精确或不确定的知识或信息中做出推理^[4]。由于专家系统推理能力比较弱，例如对于凝结水溶解氧异常、饱和蒸汽硅异常、给水溶解氧异常等推理分析，用专家系统诊断效果并不理想，因此本系统采用贝叶斯网络作为诊断推理的环节，通过构造贝叶斯诊断网络的拓扑结构，研究贝叶斯网络学习算法，使贝叶斯诊断网络能依据更新的专家知识，实时而快速地自我编辑与修正。

贝叶斯网络表达的条件独立性能有力表达设备故障之间的关联关系，可以根据已有专家知识快速计算待求概率值的过程，即利用一些故障征兆快速计算故障原因概率信息的过程，还可以同时获得其它故障节点变量的概率信息^[5]。贝叶斯诊断网络拓扑如图 2 所示：

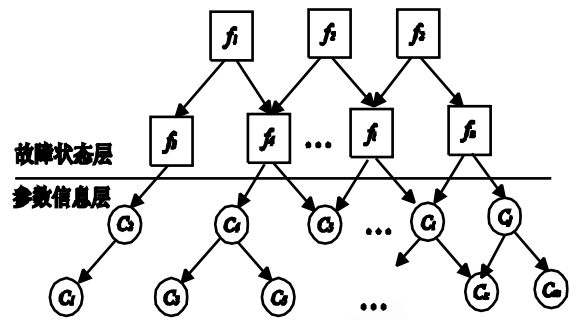


图 2 贝叶斯诊断网络结构

在图 2 中贝叶斯网络分为故障状态层和参数信息层：

对于故障状态层，节点变量： $(f_1, f_2, \dots, f_n)n$ 来表示机组运行中所有可能的故障状态(可能取值：严重 f_{11} ，较严重 f_{12} ，中等 f_{13} ，较轻 f_{14} ，无 f_{15})，并且对于故障状态可以进一步分为各种子故障(来自诊断知识数据库)，即状态层中节点存在父子关系。

对于参数信息层，节点变量： $(C_1, C_2, \dots, C_m)m$ ：来表示机组运行中所有可能的故障原因(可能取值：很高 C_{11} ，高 C_{12} ，合格 C_{13} ，低 C_{14} ，很低 C_{15})，即表示诊断过程中的各种实际水汽参数的异常变化。

图 2 中连接各个节点的有向边表示节点间的依赖关系，即先验概率，共分为 3 类：

- ① 状态 $f_{ij} \rightarrow$ 状态 f_{ij} ，表示了状态之间转换的概率；
- ② 状态 $f_{ij} \rightarrow$ 参数 C_{pq} ，表示当前状态决定了参数取值的概率；
- ③ 参数 $C_{pq} \rightarrow$ 参数 C_{pq} ，表示了两个参数值之间影响的概率；

其中， $i=1,2,\dots,n$ ， $p=1,2,\dots,m$ 及 $j,q=1,2,3,4,5$ 。 n 为故障状态总数， m 为参数总数。

在诊断系统中运用到贝叶斯诊断网络的两种推理形式：①因果推理：采用反向推理的方式，由原因推出结论，即从参数信息层 \rightarrow 故障状态层推理。主要作用是求出在参数的异常情况下，预测在某种故障状态可能发生的概率。②诊断推理：采用正向推理的方式，由结论推出原因，即从故障状态层 \rightarrow 参数信息层推理。主要作用是在发生某种故障状态后，诊断出参数异常，即故障的原因。

同时对于诊断方式又分为实时诊断和离线诊断。①实时诊断：采用的推理形式是因果推理。对水汽参数进行实时监控和统计，当监控到水汽参数

发生异常变化时,计算出相应故障状态的发生概率。并将结论传给专家知识库,依据验证规则进行评估、解释和预测,并发出警报,提示操作员进行处理或者根据关联的修复过程自动处理,另外送入报警事件数据库存储。②离线诊断:采用的推理形式是诊断推理。已知当前故障模式,由操作员输入,经 Bayes 诊断网络,诊断出参数的异常概率,然后进入诊断知识库进行评估、解释和预测,并输出结果至报警事件数据库。

初始贝叶斯诊断网络的拓扑结构和概率的设定来源于专家知识,称之为先验贝叶斯网络,其条件概率往往是主观的,不可能完全匹配机组运行出现的实际情况。贝叶斯网络学习即先验贝叶斯网络和数据相结合而得到后验贝叶斯网络的过程。根据数据样本的完整性分为完整数据下的学习算法与不完整数据的学习算法:MLE(极大似然)算法,MAP(极大后验)算法。贝叶斯网络的学习并不是一劳永逸的,在实际应用过程中,可以根据新的样本重新学习,以调整所得到的贝叶斯网络(包括结构和条件概率表),即上次学习得到的后验贝叶斯网络变成下一次学习的先验贝叶斯网络,图3描述其学习过程。

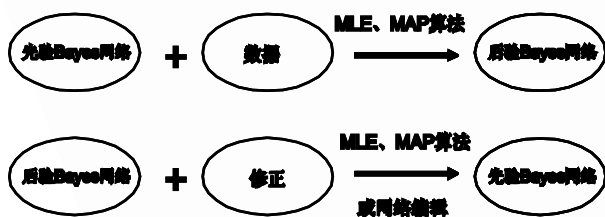


图3 贝叶斯网络学习

3.2 灰色系统理论

灰色系统理论提出了对各子系统进行灰色关联度分析的概念,意图透过一定的方法,去寻求系统中各子系统(或因素)之间的数值关系^[6]。因此,灰色关联度分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量,非常适合动态历程分析。本系统可以利用灰色关联度分析维护、更新专家知识库,并驱动贝叶斯网络学习,使其诊断拓扑更符合实际机组运行工况。

水汽系统中的各种水汽状态之间相互紧密地联接在一起,各种水汽化学指标之间具有延续性、传递性以及同步关联性,为分析各个环节水汽的变化而引起的连锁反应,本系统利用灰色系统理论研究各个环节

水汽工况之间的关联度。

由于各化学指标数列的量纲不同,在计算 $|X_i - X_0|$ (X_0 : 参数数列, X_i : 比较数列)时无法进行,因此在计算关联系数前,要对数据进行无量纲处理。处理方法有初值化、均值化和区间相对值。这里无量纲处理时采用初值化方法,即 $X'_{ik} = X_{ik}/X_{i1}$ (X_{ik} 为序号 k 上的观测数据为 $x_i(k)$; X_{i1} 为序号 1 上的观测数据为 $x_i(1)$, $k=1, 2, \dots, n$)。关联系数的计算公式如下:

$$\xi(x_o(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{oi}(k) + \theta \max_i \max_k \Delta_{oi}(k)}{\Delta_{oi}(k) + \theta \max_i \min_k \Delta_{oi}(k)} \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta_{oi}(k) = |x_o(k) - x_i(k)|$; θ 称为分辨系数, $\theta \in (0, 1)$; $\xi(X_o, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi(x_o(k), x_i(k))$ 称为数列 X_i 关于 X_0 的关联度。

水汽系统的灰色关联度分析可分为 3 个层次: 状态-状态层, 状态-参数层, 参数-参数层。

① 状态-状态层

如图 2 所示,不同的故障状态节点可能涉及相同或不不同的参数节点,但故障状态节点之间可能潜在地存在某种趋同或趋异的变化规律。

以某一故障状态 G_t (其中 t 为时间), 计算与其它 G_t 之间的灰色关联系数 ξ_t , 这里的关联程度, 实质上是曲线间几何形状的差别程度。

曲线间差值大, 表明两者具有趋异的变化规律。曲线间差值小, 表明两者具有趋同的变化规律。

② 状态-参数层

同一故障状态 G 与多种水汽参数相关, 不同的水汽参数对 G 的影响程度是有差别的, 为了挖掘这些差别, 需要进行状态-参数层的灰色关联度分析。

设数列 $(G, C)_t$ (其中 t 为时间) 为状态 G 取不同值的情况下, 相关参数的值域序列。计算不同时刻的数列 $(G, C)_t$ 之间灰色关联系数 ξ_t , 通过比较 ξ_t 的大小, 可以得到引发该故障的主要原因。

③ 参数-参数层

不同参数之间也可能潜在地存在某种趋同或趋异的变化规律, 以某一参数 C_t (其中 t 为时间), 计算与其它 C_t 之间的灰色关联系数 ξ_t 。

4 软件开发

故障诊断系统以 Windows XP 为运行环境, 软件

开发环境为 Microsoft Visual Studio.NET 2005, 采用 Microsoft SQL2000 企业版数据库作为故障诊断系统的专用数据库, 监控对象为 6 台 300MW 的亚临界机组水汽系统, 包括凝结水、给水、炉水和蒸汽四个部分的化学诊断, 主要功能有实时数据的采集、显示、实时故障诊断, 诊断结果的查询, 历史数据的分析, 故障知识库的管理, 重要化学参数的预测等。

如图 1 所示系统由 2 部分组成: ①后台数据采集及通信软件; ②前台故障诊断软件。后台软件运行在 iFix 监控上位机上, 前台软件运行在独立的主机上, 两台主机通过 TCP/IP 协议进行通信。

初始贝叶斯诊断网络的构建源于专家知识, 示例如下:

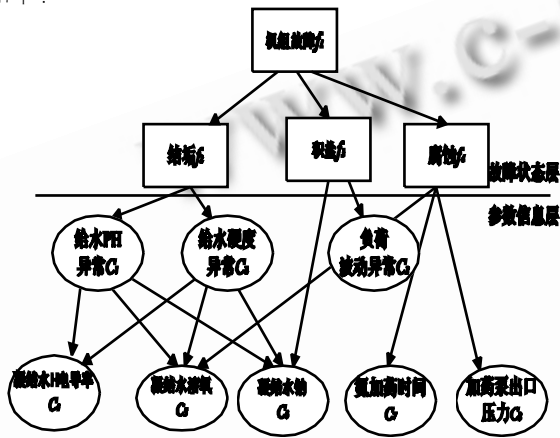


图 4 贝叶斯诊断网络示例

依据图 4 网络拓扑, 下面给出参数信息层->故障状态层推理的条件概率分布:

- $f1 \leftarrow f2(0.33), f3(0.33), f4(0.33)$
- $f2 \leftarrow C1(0.6), C2(0.4); f3 \leftarrow C3(0.5), C6(0.5);$
- $f4 \leftarrow C5(0.6), C7(0.2), C9(0.2)$
- $C1 \leftarrow C4(0.4), C5(0.4), C6(0.2); C2 \leftarrow C4(0.33), C5(0.33), C6(0.33)$

实际应用过程中, 一方面贝叶斯诊断网络根据新的数据进行学习, 调整其的结构和条件概率表, 使其符合实际工况, 如修改: $f2 \leftarrow C1(0.8), C2(0.2), f4 \leftarrow C5(0.7), C7(0.3)$ 。另一方面依据诊断结果和历史数据, 计量各个网络节点之间的灰色关联度, 系统设定灰度分辨系数为 0.5, 发现 C7 和 C4, C7 和 C1, f3 和 C6 有较高的关联度, 进而更新贝叶斯诊断网络: $C4 \leftarrow C7(0.8), C1 \leftarrow C7(0.9), f3 \leftarrow C3(0.2), C6(0.8)$ 。本系统已经投入电厂的试运行, 取得了满意的效果。

5 结语

本系统充分利用现有的水汽监控系统资源, 整合分析单元水汽质量异常信息, 实时诊断并预测机组运行工况, 改变当前重监测而轻诊断管理模式, 同时为运行人员提供切实的帮助与指导, 以避免事故发生, 保障了热力系统的安全。

参考文献

- 1 龚询洁. 热力设备的腐蚀与防护, 北京: 水利电力出版社, 1998.150-165.
- 2 朱志平, 杨道武, 李宇春. 磷酸盐处理汽包锅炉技术的比较研究. 发电设备, 2003, 17(3): 14-19.
- 3 Qian X, Li XX, Jiang YR. An expert system for real-time fault diagnosis of complex chemical processes. Expert Systems with Applications, 2003, (24): 425-432.
- 4 李俭川, 胡葛庆, 秦国军, 等. 贝叶斯网络理论及其在设备故障诊断中的应用. 中国机械工程, 2003, 14(10): 896-900.
- 5 杨革, 吴捷. 火电厂锅炉常见故障挖掘诊断方法. 仪器仪表学报, 2005, 26(7): 695-671.
- 6 邓聚龙. 灰色预测与决策. 武汉: 华中科技大学出版社, 1986.89-100.