

化工过程智能故障诊断技术方法论的研究

赵 瑾, 申忠宇

(南京师范大学 控制科学与工程系, 江苏 南京 210042)

[摘要] 动态系统故障诊断是解决现代化工业系统可靠性和安全性必不可少的关键技术之一. 简要地讨论化工过程智能故障诊断技术的发展状况和趋势后, 根据化工过程智能故障诊断技术的特点, 系统地对比化工过程智能故障诊断技术的多学科特点以及技术策略方法进行研究, 强调其科学性、集成性、应用性以及渗透性, 将分析与综合、定性定量、假设与验证相结合等基本思维方法应用到化工过程智能故障诊断中, 形成化工过程智能故障诊断技术的方法论.

[关键词] 化工过程, 智能故障诊断技术, 多学科, 技术策略

[中图分类号] TP277, **[文献标识码]** A, **[文章编号]** 1672-1292(2004)03-0018-05

0 引言

现代化科技的高速发展, 使化工过程的生产结构、生产规模日趋复杂化、现代化和大型化, 由此产生的故障机理也变得越来越复杂. 因此从不同的学科和研究方向, 以不同的技术手段, 深入研究化工过程的故障机理, 设计各种适应于化工过程故障检测与诊断技术并投入到实际应用中, 提高化工生产的安全性、先进性、可靠性, 显得尤为重要. 本文简要地探讨化工过程智能故障诊断技术的发展, 系统地研究化工过程智能故障诊断技术所呈现多学科的特点和技术策略.

1 化工过程智能故障诊断技术

故障诊断技术是一门集现代控制理论、测控及信号处理技术、计算机技术、智能控制理论等众多理论的新兴综合性学科. 近几十年来, 动态系统的故障诊断技术在理论和实际应用中都得到迅速发展, 出现了基于不同原理的众多方法, 这些方法在检测性能、诊断性能、分离性能、鲁棒性能等方面都有很大的提高, 在有些领域已形成比较完整的理论体系结构如动态线性时不变系统, 并发表了相应的论文和综述文章^[1-7]. 目前公认的故障诊断方法分为3大类^[1]: 基于定量模型的方法、基于知识的方法和基于过程历史数据的方法(又称基于信号处理的方法).

化工生产过程是特殊的动态系统, 不同于一般的工业生产, 其生产环境常常处于高温高压、低温

真空、有毒或腐蚀性等极端条件下, 一旦发生故障则可能造成严重的危害和不可估量的损失, 甚至威胁到人身安全. 化工过程故障诊断是解决化工生产过程系统可靠性、安全性科学决策问题的关键技术之一. 图1^[8]为化工过程的故障诊断过程, 主要分为3大部分: (1) 检测表征系统状态的各种特征信号; (2) 对所检测的特征信号提取征兆, 即信号处理和特征变换; (3) 由征兆和其它诊断知识来识别系统的异常状态, 对故障进行判断、定位, 并做出诊断决策, 干预系统工作.

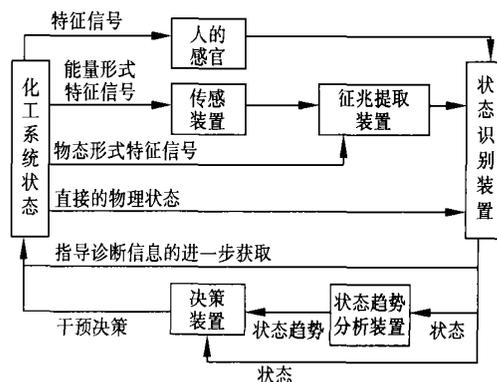


图1 化工过程的故障诊断过程

随着高新技术、新材料的发展及应用, 为了最大限度提高生产效率和产品质量, 导致化工过程的生产装置、控制装置、控制系统等向大型化、复杂化、智能化、一体化等方向发展, 从而使产生故障的潜在可能性、故障的机理、故障形成的方式发生了很大的变化, 造成化工过程的故障诊断实现的困难程度加大. 因此, 根据化工生产过程的特殊性, 将计

收稿日期: 2004-02-13.

作者简介: 赵瑾(1961-), 女, 博士研究生, 副教授, 主要从事控制理论与动态系统的故障诊断技术以及智能化, 网络化控制装置的应用等方面的研究. E-mail: zhaojin@njnu.edu.cn

计算机技术、智能控制理论、优化理论、信号处理技术等新型综合理论技术应用在故障诊断系统中, 形成化工过程智能故障诊断技术, 近年来已成为国际过程系统工程学术界和工业界研究的热点之一^[8-11], 受到极大的重视。化工过程智能故障诊断技术是确保化工生产安全运行、维护管理以及提高企业经济效益的关键。

基于定量模型的故障诊断方法以现代控制理论为基础, 通过描述系统内部特性信息的系统动态数学模型, 利用 Kalman 滤波器方法、观测器方法、等价空间方法和参数估计方法等构造反映故障信息的残差, 以相应的统计分析和决策方法, 实现故障检测与诊断。但是这些技术在化工过程故障诊断的应用中存在着一些问题: (1) 难于建立精确的动态系统数学模型; (2) 化工过程的非线性特性; (3) 建模过程中的不确定性因素; (4) 各种扰动和噪声等; 使基于定量模型的故障诊断方法在化工过程中应用中遇到许多难以逾越的障碍。目前基于定量模型的故障诊断技术研究的重点在于: 首先如何运用智能控制理论、优化理论、混沌理论以及遗传算法等不断涌现的新型理论, 提高基于定量模型的故障诊断技术智能性、鲁棒性灵敏度; 其次如何提高基于定量模型的故障诊断技术实际应用, 尤其在化工过程这样的流程工业领域, 将该技术与其它智能故障诊断技术相互融合、渗透, 构成复合型、集成化的故障诊断系统, 成为基于定量模型的故障诊断技术应用到化工过程的方向之一。

随着动态系统复杂性的增加, 造成获取系统精确数学模型的困难, 同时系统故障的多样性, 使故障和征兆之间的关系不是简单的一对一的对应关系, 往往需要通过探索过程实现故障诊断。基于知识的故障诊断方法引入了许多诊断对象多方面的信息, 特别是可以充分利用领域专家的诊断知识, 避免了对精确数学模型的过分依赖, 从而实现定性、定量知识的有机结合。专家系统、神经网络、模糊逻辑及推理、模式识别、小波分析等智能技术的不断发展以及在化工过程故障诊断中的应用, 形成了化工过程智能故障诊断技术。化工过程智能故障诊断技术的特点在于其能模拟人脑处理各种模糊信息, 又具有人脑所不及的高运算速度; 充分利用领域专家的诊断知识, 避免了对精确数学模型的过分依赖; 同时利用神经网络自动校正诊断模型, 具备自动获取知识和适应环境变化的能力, 实现对化工过程的多故障、多过程、突发性故障进行快速准确的智能检测与诊断。

化工过程智能故障诊断方法^[8]常见的有: 基于故障树方法、模型识别诊断方法、灰色诊断方法、模糊诊断方法、专家系统诊断方法、神经网络诊断方法以及基于多智能体诊断方法等。当前研究比较活跃的化工过程智能故障诊断的几个分支是专家系统、模糊理论和人工神经网络结合、混合集成智能诊断等。专家系统诊断利用了专家积累的丰富实践经验, 模拟专家分析和解决问题思路进行推理、解释、判断, 得出诊断结论^[12], 如化工过程故障预测、诊断和补偿专家系统 FEDCS, 但是专家系统诊断方法的发展受到知识获取的“瓶颈”和“窄台阶”等困难的限制, 使其在应用过程中有一定的局限性。于是^[13]利用分布式人工智能的知识共享和重用原理、方法, 提出了依层次化对象分解构建化工过程面向对象的集成故障检测与诊断系统的方法, 建立了基于知识共享和重用的化工过程故障诊断原型系统 (GCFDS)。近年来模糊逻辑、神经网络理论的发展及应用, 为人工智能的发展开辟了一条崭新的途径, 神经网络通过故障信息学习获取知识, 进行知识存储, 而且有联想记忆能力以及并行处理、全局作用的能力, 使其在处理非线性问题和在线估计有很强优势。模糊逻辑则是利用隶属函数和模糊规则进行模糊推理, 实现故障诊断。但是不管神经网络的诊断方法还是模糊故障诊断方法在单独应用在化工过程中都存在着不足之处, 即未能充分利用许多特定领域中专家积累起来的宝贵经验, 在故障诊断的准确性、灵敏度、可靠性等方面有缺陷。由此提出一种化工过程混合集成智能故障诊断系统, 如将模糊理论与神经网络相结合; 模糊理论与专家系统相结合; 神经网络与遗传算法、模糊理论相结合; 模糊理论与专家系统、神经网络、小波技术相结合。如文献[14]综合信号处理方法、专家系统和神经网络技术等, 提出集成型化工过程智能故障诊断系统的框架。混合集成智能故障诊断技术将成为化工过程智能故障诊断的方向之一, 为化工过程智能故障诊断开辟广阔的应用前景。

综上所述, 化工生产的大型化、连续化、高速化, 使其生产过程的机理机构以及化工过程故障诊断日趋复杂, 但是相关智能技术和高新技术的进步及发展, 又为化工过程智能故障诊断提供了强有力的技术支持, 支配着化工过程智能故障诊断技术的不断发展和演变。

2 化工过程智能故障诊断技术的多学科特点

众所周知, 学科是按照学问的性质进行划分的

门类,学科的特点及存在的意义主要在于其研究的对象和研究方式的独特性。文献[15]提出了现代化机械故障诊断技术朝多样性和智能性方向迅速发展,并呈现出明显的科学性、应用性和交叉性特征。化工过程智能故障诊断技术与现代化机械故障诊断技术相比有共同性,也有异同性。

化工过程智能故障诊断技术与计算机、自动控制、信号处理、智能控制(人工智能、神经网络、模糊控制等)以及系统工程等学科有着广泛的联系和交互,属于学科交叉和高新技术探索的领域,是一门理论性和应用性相结合的新兴学科。和现代化机械故障诊断技术一样,化工过程智能故障诊断技术的多学科特点主要体现在:严谨科学性、独特的集成性、广泛的应用性、多学科的渗透性。所以正确地认识化工过程智能故障诊断技术的学科特征,有助于该技术的理论研究和工程应用。

2.1 严谨的科学性

化工过程智能故障诊断技术具有非常强的工程背景以及重要的实用价值,并且以扎实的理论为基础,系统论、信息论、控制论(现代控制和智能控制理论)、统计论等最新的技术在其中都有广泛的应用。对学科本身而言^[15],它是一个逻辑严密、内容丰富、不断发展的理论体系。化工过程智能故障诊断技术作为交叉学科领域的一门专业性技术,其严谨的科学性体现在三个方面:一是对涌现的新兴理论的不断探索,理论的探索不是只停留在理论研究,处在高高在上的位置,而是将理论的研究应用到实际过程中,指导技术的发展;二是体现在研究工作者的科学态度,即在进行化工过程智能故障诊断研究过程中,实事求是,精益求精,特别对化工过程大量的实时数据和历史数据的挖掘和处理,合理选择相应的方法提取与故障有关的特征信号和征兆;三是体现感性思维和理性思维相互融合,不是沉溺于已有的专家经验和知识,而是通过收集、分析、归纳、概括和综合,使经验上升为理论,又将理论应用于实践,用科学的理论和理论指导的技术,促进化工过程智能故障诊断技术的不断发展。

2.2 独特的集成性

化工过程发生的故障主要表现为现场的各种化工设备潜在的故障和过程参数与各类现场仪表(传感器、执行器等)的故障。目前在化工工业系统中,防止设备故障的方法大多数采用定期维修方式,随着现代化科学技术的不断发展,运用化工设备的故障诊断技术可以将过去的定期维修变为预知维修,避免失修和过剩维修,提高企业的经济效

益。就化工过程而言,生产过程大而复杂,自动化程度高,单一的诊断方法很难满足整个化工生产故障诊断的要求。特别是化工过程的各种工艺参数(温度、液位、压力、流量、成分等)以及其它系统参数的异常变化方式各不相同,不能采取相同的数据处理方法提取故障特征及故障信息。由此提出化工过程智能故障诊断技术必须具备的集成性,将各种数据处理方法以及各种基于不同原理的故障诊断技术有机地结合起来,构成统一的整体,相互取长补短,构成所谓集成智能化故障诊断系统,实现对整个生产系统的状态监测和故障诊断。如将故障诊断的知识多元化的特征,以及各类表层知识及深层知识加以有效的整合,寻求恰当的知识组织,利用基于知识以及基于其他诊断原理的诊断方法,解决在工程实际应用中所遇到的问题。

2.3 广泛的应用性

化工过程智能故障诊断技术具有很强的工程应用背景,即提高化工过程的可靠性、安全性以及可操作性,防止和杜绝影响生产正常运行的早期故障的产生、故障严重性的发展,创造良好的经济效益和社会效益。因此设计化工过程智能故障诊断系统时,不是仅仅停留于理论上的研究,而是要充分考虑化工过程的实际应用背景,使该诊断技术真正运用到实际的生产过程中。如在化工过程的故障机理分析时,必须弄清故障产生的原因、发生的部位、时间特性以及故障生成和发展的支配因素,采用何种数学模型或知识描述,以及何种理论与方法对其分析评判决策。又如对化工过程诊断知识的分析处理时,首先选择合理的领域知识表示方法,根据故障知识的特点进行分层,由一般到特殊,层层深入,有利于现场应用。文献[16]提出人工神经网络的故障诊断方法,并应用在硫化催化裂化单元;文献[14]将小波分析、专家系统和神经网络等技术相结合,研究开发了化工过程集成型智能故障诊断系统,并应用在润滑油酮苯脱蜡油回收装置中。

2.4 多学科的渗透性

化工过程智能故障诊断技术作为理论性、集成性、应用性和实用性非常强的技术,具有明显的多学科渗透性,所涉及的学科门类多、范围广、技术含量高,不仅包括基础理论知识和专业基础理论知识,而且还包括现代控制理论、鲁棒控制理论、智能控制理论、遗传算法、优化理论和信息理论等,以及各学科交叉的前沿学科的理论如自动化学科与分子生物学、人类基因破译、生物工程、复杂性科学等的渗透。

化工过程智能故障诊断技术的多学科渗透性主要体现在:(1) 化工过程本身与原理有关的学科,如化学工程、化工原理等;(2) 测量化工过程信号有关的测试技术、信号处理及特征提取相关的学科,如传感器技术理论、各类测试技术等;(3) 与控制化工过程相关的学科,如控制理论、控制工程以及各类控制装置等;(4) 故障诊断领域所特有的一些学科,如容错技术、可靠性理论等;(5) 与诊断模式和途径、智能诊断相关的学科,如系统辨识、模式识别、灰色理论、专家系统、人工智能、信息技术理论、模糊理论、计算机科学、神经网络理论、遗传算法等。当然,上述各种学科应用到化工过程智能故障诊断领域中,并不是简单相加过程,而是彼此之间的渗透融合。化工过程智能故障诊断技术是一个复杂、庞大的系统工程,其高度的综合性和涉及面的广泛性,向研究工作者的学识与科研能力提出了新的要求和新的挑战。

3 化工过程智能故障诊断技术的技术策略和思维方式

化工过程智能故障诊断往往是在条件很不具备或困难与复杂并存的情况下进行的,在诊断过程中常常会遇到意想不到的各种各样的问题,因此讲究技术策略、重视思维方法显得尤为重要。

讲究技术策略是在系统论、信息论、控制论等科学方法论的指导下,充分认识被诊断的过程或对象以及环境等,针对实际问题的特征,选择合理的技术路线与方法,形成化工过程智能故障诊断的最佳技术方案;同时严密组织诊断系统与诊断过程,研究智能故障诊断的理论和算法,避免混乱与失误;此外,合理地分析、应用和综合各种基于智能理论的故障诊断技术,寻求最优方法和最佳途径,形成集成型、综合型的化工过程智能故障诊断技术,实现快速准确地预测、检测和诊断故障,使故障引起的各种危害降到最低程度。化工过程智能故障诊断的技术策略是将复杂结构层层分解,从总体到细节深入;充分运用化工过程的实时数据、历史数据,建立相应的智能监视和诊断网络;抓住关键,顺藤摸瓜,综合判断,由此深入透彻地实现对化工过程各类故障的智能诊断。

思维的严谨性、逻辑性、数值化、创新性是智能故障诊断过程的基本特征,在数字化、网络化和信息化的现代化化工工业环境里进行智能故障诊断,仅仅凭过去的经验与方法,盲目试探的做法是难以奏效的。

分析是将事物分解为各个属性、部分与方面,而综合则是将事物的各个部分与方面结合成为一个整体,两者密不可分。化工过程是复杂系统,在对其进行智能故障诊断时应将化工过程各层次、结构、功能与故障分解,作深入细致地分析,如结构分解是从结构上对生产过程和装置进行分解,把过程和装置的总体结构分解为一层一层的子系统,直到分解到最低层为止。当然仅仅了解系统构成的细节、子系统是不行的,还要从整体的高度去考察系统的整个组成部分。所以,分析与综合相结合是实现化工过程从细节到整体,又从整体到细节的进一步认识。

定性分析侧重于所研究对象属性的分析,定量分析则是通过观察、测试、统计、分类、计算和数据处理等实现的。在化工过程智能故障诊断过程中,将两者相结合,达到最佳的诊断效果,实现定性、定量知识的有机结合。如文献[17]提出根据定性模拟和定性推理的定性故障检测和诊断方法,以及将定性方法和定量方法相结合,互相弥补不足,提出的半定性故障检测和诊断方法。利用定性信息和定量信息已成为化工过程智能故障诊断领域的一种强有力的工具。

假设应尽量将思路展开,尽可能充分考虑任何一种可能原因;验证则要找出具有充分说服力的证据,不能模棱两可。由于存在种种困难和障碍,经常要通过迂回的途径来达到弄清对象或事物的目的,这时可以针对所研究对象或事物的状态做出某种假设,再通过适当方式对假设进行验证以确定其真伪,将假设与验证相结合。在智能故障诊断中的基于浅知识的诊断推理、基于深知识的诊断推理以及结合浅知识和深知识的诊断推理、在智能专家系统的正一反向混和诊断推理等就是该策略的应用范例。假设与验证相结合,就是将积极的探索精神和严格的科学态度结合起来,以取得更大的成效。

4 结束语

化工过程智能故障诊断技术是一门集科学性和应用性为一体的高度综合的交叉技术,其发展离不开理论基础和应用效益,以及沟通这两者的高效快捷的桥梁(如MATLAB等优秀软件),同时它也对控制理论和控制工程的发展起到了强有力的推动作用。

本文所述的化工过程的智能故障诊断技术方法论,主要从其学科特征、技术特征和思维方法等方面进行讨论,目的是为了进一步构建和完善在

进行化工过程智能故障诊断过程中的指导工作,以及方法论层次的故障诊断理论体系框架,同时有助于对化工过程智能故障诊断的深入研究和探索.

[参考文献]

- [1] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kewen Yin, *et al.* A review of process fault detection and diagnosis part I: Quantitative model-based methods[J]. *Computer & Chemical Engineering*, 2003, 27(3): 293 - 311.
- [2] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kewen Yin, *et al.* A review of process fault detection and diagnosis part II: Qualitative models and search strategies [J]. *Computer & Chemical Engineering*, 2003, 27(3): 313 - 326.
- [3] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kewen Yin, *et al.* A review of process fault detection and diagnosis part III: Process history based methods[J]. *Computer & Chemical Engineering*, 2003, 27(3): 327 - 346.
- [4] Frank P M, Ding S X, Marcu T. Model-based fault diagnosis in technical processes[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2000, 22(1): 57 - 101.
- [5] Mehra R K, Peschon J. An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamics [J]. *Automatica*, 1971, 7(5): 637 - 611.
- [6] Willsky A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems[J]. *Automatica*, 1976, 12(6): 601 - 611.
- [7] 陈玉东,施颂椒,翁正新. 动态系统的故障诊断方法综述[J]. *化工自动化及仪表*, 2001, 28(3): 1 - 14.
- [8] 黄启明,钱宇,林伟璐,等. 化工过程故障诊断研究进展[J]. *化工自动化及仪表*, 2000, 27(3): 1 - 5.
- [9] Sharif M A, Grosvenor R I. Process plant condition monitoring and fault diagnosis[J]. *Proc Instn Mech Engrs Part E*, 1998, 212(1): 13 - 30.
- [10] Fathi Z, Ramirez W F, Korbicz J. Analytical and knowledge-based redundancy[J]. *AICHE. Journal*, 1993, 39(1): 42 - 56.
- [11] Bhagwat A, Srinivasan R, Krishnaswamy P R. Fault detection during process transitions: a model-based approach[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(2): 309 - 325.
- [12] 李华生,袁一. 化工过程故障预测、诊断和补偿专家系统 FEDCS 的开发[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 1995, 22(1): 6 - 11.
- [13] 孙京诒,杨欣斌,黄道. 基于知识共享和重用的化工过程故障诊断技术研究[J]. *华东理工大学学报(增刊)*, 2002, 28(9): 34 - 37.
- [14] 钱宇,李秀喜,江燕斌,等. 化工过程集成型智能故障诊断系统研究与开发[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(11): 142 - 146.
- [15] 黄志坚,裘丽华. 对现代机械故障诊断技术方法论的探讨[J]. *科学技术与辩证法*, 2001, 18(3): 26 - 29.
- [16] Venkatasubramanian V, Chan K. A Neural Network Methodology for Process Fault Diagnosis[J]. *AICHE. Journal*, 1989, 35(12): 970 - 984.
- [17] 王文辉,周东华. 基于定性和半定性方法的故障检测与诊断技术[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(5): 653 - 665, 659.

Study of Technique Method for Chemical Process Intelligent Fault Diagnosis

ZHAO Jin, SHEN Zhongyu

(Department of Control Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: One of the key techniques for solving the problem in reliability and safety of modern industries is fault diagnosis in dynamic systems. The paper briefly discusses the development and trend of intelligent fault diagnosis technologies in chemical processes, systematically studies the multi-subject characteristics and technical strategies about the intelligent fault diagnosis technique in chemical processes, with its science, integration, application and penetrability emphasized, and applies the basic thinking methods involving analysis and synthesis, qualitative analysis and quantitative analysis, hypothesis and verification so that the chemical process intelligent fault diagnosis technique can be devised.

Key words: chemical process, intelligent fault diagnosis technique, multi-subject, technical strategy

[责任编辑:刘健]