文章编号：1000－8152(2002)05－0653－07

基于定性和半定性方法的故障检测与诊断技术*

王文辉，周东华
（清华大学 自动化系，北京 100084）

摘要：首先介绍了基于定性和半定性方法的故障检测与诊断技术的产生背景和发展状况，然后分基于定性方法和基于半定性方法.——两大类介绍了主要的故障检测和诊断技术，讨论了各种方法的优缺点，介绍了一些典型的应用实例，并对发展的趋向进行了探讨.

关键词：故障检测；故障诊断；定性推理；定性仿真；带符号有向图；模糊集理论

中图分类号：N032/B119　　**文献标识码**：A

Survey on qualitative/semi-qualitative based fault detection and diagnostics techniques

WANG Wen-hui, ZHOU Dong-hua
(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents a survey on qualitative/semi-qualitative based fault detection and diagnostics techniques. We first introduce the background and the objective of these techniques. Then, we divide various fault detection and diagnostics methods into two groups and discuss their advantages and disadvantages. Some typical application examples are presented and finally, we point out the developing trend of these techniques.

Key words: fault detection; fault diagnosis; qualitative reasoning; qualitative simulation; signed directed graph; fuzzy sets

1 引言(Introduction)

在现代控制系统中，由于系统复杂性的日益提高，规模的不断扩大，系统常常要面对不可预期的变化.为了设计可靠的容错控制系统，或者将复杂系统的性能维持在高水平上，需要正确检测并诊断出这些变化，并采取相应措施来重新配置系统.因此，为了保障控制系统的可靠性与安全性，基于解析冗余的故障诊断与容错控制技术已成为自动控制领域的一个热点研究方向[1－4].

故障(fault)可以定义为：系统至少一个特性或参数出现较大的偏差，超出了可以接受的范围.此时系统的性能明显低于正常水平，所以难于完成系统预期的功能[5].所谓故障检测与诊断(fault detection and diagnosis —— FDD)是指根据系统症候，确定系统是否发生了故障，确定故障的种类，故障发生的部位，并确定故障的大小以及故障发生的时间[6].

1971 年 Beard 发表的论文[7]和 Mehra 及 Peschon 在 Automatica 上发表的论文[8]是公认最早的故障诊断领域的论文.1976 年，Willsky 在 Automatica 上发表了第一篇 FDD 方面的综述文章[9].许多学者加入到这一研究领域，提出了许多研究方法.例如基于状态估计的方法，基于参数估计的方法，基于信号处理的方法，基于知识的方法等[6].目前在国际上，每年发表的有关 FDD 方面的论文都在一千篇以上.

在应用中，人们发现传统的基于定量信息的故障诊断方法，往往由于以下原因无法实现：

· 故障不能用解析模型合理地描述，如阀堵塞或者管道破裂[1].

· 系统的先验知识不完备、不确定，以致不能建立定量的系统模型[1,10].

· 系统知识是定性信息.例如，“水位高”这个信息就不能毫无歧义地转换为定量值[1].

· 系统本身过于复杂，只能采用近似模型.或者测量值包含噪声，这样模型就不精确[10].

为了解决上述问题，我们可以采用定性和半定性的方法来进行故障检测和诊断.定性和半定性故障检测和诊断方法的基础是定性模型和定性推理.早在 70 年代末，美国施乐(XEROX)公司的 de Kleer 和 Brown 首次提出了定性推理的概念.1983 年，de Kleer 和 Brown 发表了论文[11]，为定性推理理论进行了奠基.1984 年，《Artificial Intelligence》杂志第一次出版了定性推理的专集. 随后，越来越多的学者加入这一研

* 基金项目：国家自然科学基金(60025307)，教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目.
收稿日期：2000－11－21；收修改稿日期：2001－05－21.

究领域,提出了许多方法,如定性仿真理论[12],定性过程理论[13],定性流式理论[11],定性代数理论[14,15],定性动力学方法[16],定性因果分析方法[17]等等.关于定性推理的综述请参见 Kuipers[18]、石纯一[19]和白方周[20]等论文.本文将重点探讨基于定性和半定性方法的故障检测与诊断技术.

基于定性和半定性方法的故障检测与诊断技术是在故障检测与诊断领域中利用定性信息形成的一种强有力的故障诊断方法,它可以较好地解决前面提到的定量故障诊断无法解决的问题.在过去的十几年里,随着定性推理理论的不断发展和定性方法与其他理论的不断融合,基于定性和半定性方法的故障诊断技术获得了长足的发展.1987 年,Kramer 和 Palowitch 在《AIChE Journal》发表了论文[21]; Kuipers 在《IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics》发表了论文[22]; Forbus 在《IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics》发表了论文[23].这些论文是比较早的基于定性和半定性方法的故障检测和诊断方面的文章.

下面,我们将按如下两大类来进行介绍:

1) 基于定性方法的故障诊断技术.

2) 基于半定性方法的故障诊断技术.

本文的第二部分,将探讨基于定性方法的故障诊断技术.在第三部分,将讨论基于半定性方法的故障诊断技术.第四部分,介绍基于定性和半定性方法的故障诊断技术的实际应用.本文最后一节是全文的总结,并对今后的发展进行展望.

2 基于定性方法的故障检测与诊断技术(Qualitative based fault detection and diagnostics techniques)

基于定性方法的故障检测与诊断,利用不完备的先验知识,采用定性的方法,对系统结构和功能进行描述,建立起定性模型,对系统进行推理,预测系统的定性行为,通过与实际的系统行为比较,检测系统是否发生故障,并诊断系统的故障原因.

2.1 基于定性仿真理论(QSIM)的诊断技术(Fault diagnosis based on QSIM)

基于定性仿真理论(QSIM)的诊断技术的理论基础是 Kuipers 于 1986 年提出的基于定性微分方程(QDE)的定性仿真理论[12].该理论认为,系统结构由表示系统变量的符号和描述参数之间关系的约束构成.系统的定性状态是由系统所有变量的定性状态构成的组合,而系统的定性行为就是系统定性状态序列.定性仿真从系统的初始状态开始,根据预先设置的状态转换表,产生所有可能的后继状态,利用约束检查状态的一致性,过滤不一致的状态,重构新的当前状态集,并从中选择一个作为新的当前状态,重复上述过程.最终得到系统的所有行为.

Kuipers 在 1987 年提出了基于 QSIM 的诊断技术[22,24],采用基于故障模型的诊断策略,利用 QSIM 方法对故障模型进行仿真,从而得到预测的系统行为.然后将观测到的故障行为与这些预测行为相比较.如果预测行为与观测的故障行为相一致,则说明系统发生故障.而预测行为与故障行为一致的故障模型成为当前系统的模型,依据建立该模型时的先验知识,进一步诊断出故障的种类和原因.这充分发挥了 QSIM 基于深层知识建模和推理能力强大的特点.这一过程被称为假设—建模—仿真—匹配循环,如图 1 所示.

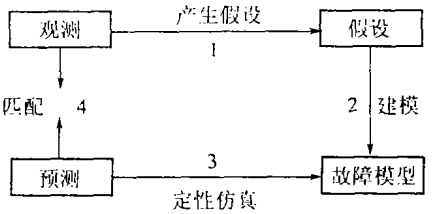

图 1 假设—建模—仿真—匹配循环

Fig. 1 Hypothesize-modeling-simulation-match cycle

这种方法适用于对所有故障都已知的系统进行故障诊断.如果存在某个未知故障,则不能建立与之对应的故障模型,因而不能准确的进行故障诊断.这是该方法本身造成的缺陷.而且,由于定性描述相对于定量描述而言比较粗糙,那么可能出现不同的故障原因对应相同的故障行为.

2.2 基于定性过程理论(QPT)的诊断技术(Fault diagnosis based on QPT)

定性过程理论(QPT)是由 Forbus 于 1984 年提出的定性推理方法[13].这种理论认为系统分析的实质就是确定构成系统的各个过程,确定这些过程在何种条件下会如何影响系统的发展.在 QPT 理论中,过程是与个体或者个体视图相关联的,而系统状态变量的值将由与其相关联的活动过程进行改变.

Forbus 于 1987 年提出了基于定性过程理论(QPT)的故障诊断技术——ATMI[23],利用定性理论对系统的观测进行解释[25~27].该方法的输入是一组测量序列.定量值被描述为量空间的表示形式.定性状态包括数量有限的组分,构成一种解释.对于一组系统测量值,存在一组定性状态集与之对应.通过削减集合中的状态,得到对系统行为的解释.

该方法通过对测量值进行解释,从而检查故障假设是否能解释观测的系统行为.这种理论仅仅依赖很少的假设,这些假设往往很容易满足.这一优点使得此方法可以应用于较广阔的领域.但是,在待研究的系统事先已知的情况下,现有的定性推理机制往往显得很慢.解决的办法是事先建立状态解释表,通过查表,可以使解释过程加快,但这个表可能非常大.

2.3 基于带符号有向图(SDG)的诊断技术(Fault diagnosis based on SDG)

Iri 和 O'Shima 等人早在 1979 年就提出了故障诊断中带符号有向图的概念[28].Kramer 和 Palowitch 于 1987 年在《AIChE Journal》发表了论文[21],提出了基于规则的带符号有向图故障诊断技术.Chang 和 Yu 又提出基于改进带符号有向图的在线诊断技术[29,30].

基于带符号有向图(SDG)的诊断技术认为故障诊断本质上是确定过程扰动的根本原因.采用带符号有向图描述系统,利用存贮在 SDG 图上的信息搜寻扰动可能的故障源,从

而有效识别系统扰动的原因.此方法的优势在于需要相对较少的信息来构造带符号有向图及用于诊断.SDG利用节点和连线来描述系统变量之间的因果关系,如图2所示.

$$A \xrightarrow{\operatorname{sgn}(A-B)} B$$

图2　SDG图

Fig. 2　Signed directed graph

其中,节点A和B表示过程变量,取值{-,0,+};节点间的有向连线表示节点间的因果关系;连线上的符号$\operatorname{sgn}(A-B)$代表节点间影响的方向,当$\operatorname{sgn}(A-B)$取值为"+",表明原因变量与结果变量变化方向相同;当$\operatorname{sgn}(A-B)$取值为"-",表明原因变量与结果变量变化方向相反.构造SDG的方法主要有两种:一种是根据过程数据或者操作者的经验构造;另一种是通过对已知的数学模型进行抽象来构造.利用SDG进行故障仿真要构造一组从给定根节点出发的有向枝(称为仿真树).仿真树表现为一组从根节点到每一个因果相关节点的路径,是对故障传递途径的预测,体现了事件因果顺序和故障源对相关节点影响的方向.

SDG方法有待提高的方面有:1)对给定的SDG和给定的故障源,由于SDG在预测故障传播途径时的不确定,存在故障传播的多种解释,其中包含虚假的系统行为,但仅从SDG却无法辨别虚假的解释.2)由于在诊断中只考虑了+和-分枝,而实际上节点之间的关系往往很复杂,例如分枝上有时滞.那么如何来描述节点之间的关系,也是需要进一步研究的.3)在运用SDG方法进行诊断时,如何结合新的知识,从而可以提高故障假说的确定性,也需要进行研究.

2.4　基于定性观测器的诊断技术(Fault diagnosis based on qualitative observers)

Zhuang和Frank提出了定性观测器(QOB)方法[2,3,31-33].定性观测器主要包括如下四部分,参见图3.

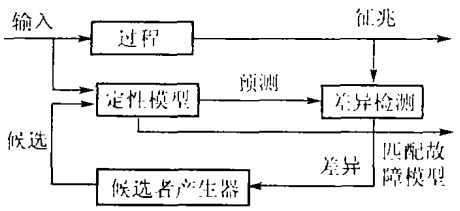

图3　定性观测器

Fig. 3　Basic configuration of the qualitative observer for fault diagnosis

1)定性模型:是定性观测器的关键部分,通过定性推理,来预测系统的行为.2)差异检测器:用于确定测量值与计算假设之间的差异.3)候选者产生器:依据差异,提出供候选的故障源.4)诊断策略:用于协调整个循环搜索过程,从而确保模型与实际过程相匹配.

基于定性观测器的故障诊断技术,通过构造系统的定性模型,对系统行为进行预测,将预测的结果与系统实际的输出相比较,利用差异检测器,衡量预测与实际之间的差异,如果存在差异则已检测出故障.将差异作用于候选者产生器,产生候选故障,反馈给定性模型,构成故障模型,直到预测与实际输出匹配,从而诊断出故障.

基于定性观测器的故障诊断技术存在以下问题:1)由于定性模型利用不完整信息,存在模型公差,使得预测较为保守,因此不能保证检测出所有的小故障.2)如果故障行为与观测器输出的虚假行为或者其它冗余行为一致,那么故障就不能被检测出,使得定性观测器的检测能力下降.3)定性观测器中的候选者产生器,根据差异,通过循环搜索来产生候选故障.即需要故障知识作为先验知识.如果故障未知,那么我们只能检测出故障,而不能进行进一步诊断.

Lichtenberg和Lunze于1997年提出了应用于离散时间系统的定性观测器[34,35],通过对系统状态进行观测,实现监督和故障诊断.

2.5　其它方法(Other methods)

1) Grantham和Ungar将Weld提出的比较分析[36-38]应用于定性过程理论(QPT),提出了在模型改变的情况下进行故障诊断的方法[39],可以预测定性方程和参数值变化的影响.

2) Yamashita提出了基于定性微分方程的故障诊断技术[40].利用定性微分方程描述系统,利用深层知识辨别故障源.引入时间尺度,消除组合爆炸问题.

3) Oyeleye, Finch和Kramer提出了MIDAS(model integrated diagnostic analysis system),应用定性建模技术,对动态过程进行故障诊断[41].

4) Mavrovouniotis和Stephanopoulos提出了O(M)——数量级系统理论,用于故障诊断[42].

5)夏常弟和万百五利用约束悬挂技术和QSIM算法,提出了应用于精确数学模型未知的连续系统的故障诊断[43].

2.6　小结(Summary)

基于定性方法的故障检测与诊断技术的主要优点如下:

1)当系统信息不完整,或者系统信息是定性信息,或者故障无法用解析模型描述时,无法建立定量模型,只能建立定性模型.采用基于定性方法的诊断技术仍然可以检测和诊断故障.

2)利用定量方法诊断时,虽然比较精确,但有时因为诊断速度问题,无法实现在线诊断;或者在对精确度要求不高的场合,利用定性方法更为适宜.

3)用定性方法描述系统,可以保证所表述系统行为的可靠性,因此可以减少误报现象.

4)定性方法利用系统的深层知识,关注于系统不同部分之间的因果性或相关性.这一特点有助于进行故障分离和故障分析.

5)利用定性方法进行故障诊断,具有较好的鲁棒性.

主要缺点如下:

1)利用定性知识进行故障诊断时,定性知识会发生组合爆炸,影响了定性方法的实用性.

2)需要预先知道故障的定性知识,否则只能进行检测,不能准确地诊断出故障的原因.

3)由于定性描述相对于定量描述而言比较粗糙,存在

冗余信息，会造成诊断结果的不唯一.

4) 利用定性方法描述系统，预测较为保守，因此微小的故障往往容易被忽略.

3 基于半定性方法的故障检测与诊断技术(Semi-qualitative based fault detection and diagnostics techniques)

所谓半定性是指，利用其它理论诸如随机理论、模糊集理论和神经网络理论等，在定性方法中加入定量的信息，将定性方法和定量方法相结合，互相弥补不足.纯粹的定性方法由于自身的缺陷，在故障诊断的实际应用中往往受到很大的限制.将定性方法与定量方法相结合，可以弥补各自的不足，吸收双方的优点，实现优势互补.

3.1 基于随机-定性方法的诊断技术(Stochastic-qualitative based fault diagnosis)

3.1.1 基于随机定性仿真(SQSIM)的诊断技术(Fault diagnosis based on SQSIM)

Mihara, Aono, Ohkawa, Wang 等人在 Kuipers 提出的定性仿真方法[12]的基础上，加入随机知识来描述系统，提出了基于随机定性仿真(SQSIM)的故障诊断技术[44~47]. 基于SQSIM 的诊断技术，对复杂系统建立定性模型，将过程抽象为元件和相互之间的因果关系，以获得系统最接近的定性描述.利用随机知识，通过分析模型行为确定故障的原因.

在随机定性仿真中，利用存在概率获得状态的存在可能性.通过预设门限，削减小概率状态，使得产生状态的数量得到抑制.用认可率来衡量模型与真实系统的匹配程度.在进行故障诊断时，我们预先准备好系统的正常模型和所有的故障模型，然后分别独立地进行仿真，根据认可率对候选故障进行排序.认可率最大的候选模型就作为故障的原因.

基于 SQSIM 的诊断技术，利用随机知识，有效减少了定性模型的冗余行为，部分地解决了状态的组合爆炸问题.该方法要求预先知道所有故障模型.而如何选择门限还没有明确的方法.

3.1.2 基于隐含马可夫模型(HMM)的诊断技术(Fault diagnosis based on HMM)

Zhuang 和 Frank 通过建立隐含 Markov 模型来处理定性建模中的不完全知识，并据此提出了基于隐含马可夫模型(HMM)故障诊断技术[33,48]，用于解决参数不确定的连续时间、连续变量的非线性动态系统的故障检测问题.

当仅知道系统的不完全知识时，在定性方法中加入随机知识，可以增强系统信息的表示能力，更有效地利用信息.通过随机定性建模，构成隐含马可夫模型(HMM)，来处理不确定传播.利用 HMM 模型构建定性输出观测器，用于产生残差.并且引入可信度指数来评估定性估计和残差.随机定性模型利用随机近似描述定性行为，引入概率函数描述定性状态，系统的量化状态空间可近似地表示为马氏链.这种方法一方面保留了定性推理中状态的抽象描述，另一方面利用比定性模型更详细的信息描述系统的不确定性.利用定性观测器，对系统输出进行观测，通过残差产生器产生故障存在指标和故障可检测性指标，进行故障诊断.

基于隐含马可夫模型(HMM)的诊断技术有待提高之处如下：1) 放宽现有对系统事件发生的概率分布要求，构造半马氏模型描述连续系统. 2) 提高系统定性观测器的解的有效性，得到故障模型.

3.1.3 基于量化系统的故障诊断技术(Fault diagnosis based on quantised systems)

量化系统是输入输出信号只能通过量化器(Quantiser)进行测量的连续变量系统.Lunze 等人提出了针对量化系统的半定性建模和诊断技术[35,49~51].实际应用中，系统模型和输入输出值往往未知.仅仅能观测到输入输出信号的定性值序列或者离散事件序列.因此需要建立系统的离散事件描述，并通过定性比较离散事件模型的事件序列，进行半定性故障诊断.如图 4 所示.

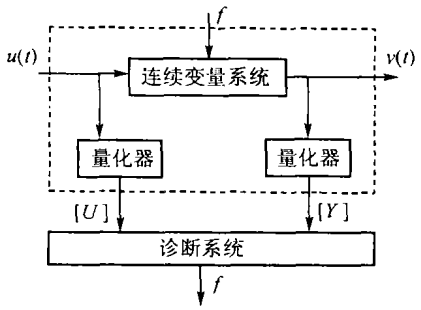

图 4 用于故障诊断的量化系统

Fig. 4 The quantised system for fault diagnosis

图中，$u(t)$ 和 $y(t)$ 表示系统的输入输出，$[U]$ 和 $[Y]$ 表示 $u(t)$ 和 $y(t)$ 经量化器得到的定性的值，f 表示故障.

量化系统由连续变量系统和量化器构成，连续变量系统的行为依赖于故障 f，系统的输入输出是通过量化器得到的定性输入输出序列.量化系统的故障诊断就是在给定输入输出序列条件下，确定故障发生的概率.

3.2 基于模糊-定性方法的诊断技术(Fuzzy-qualitative based fault diagnosis)

Shen 和 Leitch 基于 Zadeh 的模糊集理论[52]，对定性仿真进行了半定量的扩展，提出模糊定性仿真(fuzzy qualitative simulation)[53~55]. 随后，Shen, Leitch, Patil 和 Hofmann 等人提出了基于模糊定性仿真的故障诊断方法[56~60].模糊定性仿真对于定性仿真有三点提高：1) 利用模糊集的隶属度函数，加入主观因素，任意构造有限且离散的量空间，更详细地描述系统变量. 2) 模糊量空间利用模糊关系，更详细的描述变量之间的函数关系，除了符号信息还有半定量的信息. 3) 量空间可以依据变化率，得到有序的状态发展和相关的当前状态持续时间，从而构造强有力的过滤规则，减少系统的冗余状态.

在定性仿真中，加入模糊集理论，可以得到有效的状态过滤规则，减少虚假行为的数量，提高仿真效率.量空间划分的任意性提供了处理不确定性的方法.由于采用定性模型，值域空间有限，因此采用基于搜索的处理方法.

Steele 提出带时间约束的基于模糊定性仿真的故障诊断

方法[58]. Patil 在 KICSS 诊断系统(基于启发式搜索和定性约束的诊断系统)[61]基础上进行了模糊扩展,形成 Fuzzy KICSS.

3.3 基于模糊-有向图的故障诊断技术(Fault diagnosis based on Fuzzy-SDG)

在基于定性方法的故障诊断中,SDG 是一种非常实用的方法.为了克服定性方法的局限性,Yu 和 Lee 在原 SDG 的基础上,加入模糊集理论,形成基于模糊-有向图的故障诊断技术[62]. 随后,Han[63], Wang[64,65], Tarifa[66]等很多学者也加入到基于模糊-有向图的故障诊断方法的研究中.

在故障诊断中,如果系统的部分定量信息已知,可以以模糊集隶属度函数的形式,将其加入到定性 SDG 方法中,从而构成基于模糊-有向图的故障诊断方法.基于模糊逻辑,假说(例如故障源)的真值可以计算[67],这样,就提高了诊断结果的有效性.而且当缺乏定量知识时,该方法就退化为定性 SDG 方法.

3.4 其它方法(Other methods)

1) Kay, Rinner 和 Kuipers 提出半定量系统辨识方法——SQUID,用于故障诊断[68].

2) Chang, Yu 和 Liou 将区间运算用于定性系统模型,进行故障诊断的方法[69].

3) Benkhedda 和 Patton 在故障诊断中,利用联合 B-样条函数,形成了半定性诊断技术[70].

3.5 小结(Summary)

基于半定性方法的故障检测与诊断技术的主要优点如下:

1) 基于半定性的诊断方法基本具备定性方法的优点.

2) 当已知的系统信息包含一定定量信息时,采用半定性的故障诊断方法可以利用这些定量信息,改进定性方法.

3) 利用给定的部分定量信息,我们可以得到精度较高的解.

4) 采用半定性推理算法,可以部分解决组合爆炸问题,提高了方法的实用性.

5) 利用随机理论、模糊集理论或者其它理论描述系统的不确定性,增加建模的主观因素,提高建模的自由度.

主要缺点如下:

1) 各种半定性方法,针对性较强,通用性较差,因此具有一定的局限性.

2) 半定性方法,利用定量信息后,使得模型变得复杂,增加了建模和诊断的时间.

3) 引入定量信息后,状态组合爆炸问题得到部分解决,但解决得不彻底.

4 应用实例(Applications)

表 1 列出了一些较为典型的应用实例.

表 1　应用实例

Table 1　Applications

序号	应用方法	应用对象	文献
1	基于模糊定性仿真的诊断方法	输配电网络、化工厂蒸馏塔	[53~56,71]
2	基于 CA-EN 的诊断方法	汽轮机、发酵动力单元	[72~75]
3	基于 QPT 的诊断方法	核电站、涡轮发动机	[72,76~78]
4	基于定性仿真的诊断方法	供热系统	[79]
5	模糊带符号有向图诊断方法	蒸馏塔	[64,66]
6	基于随机定性推理的故障诊断方法	空调系统	[44~47]
7	量化系统的诊断方法	汽车燃料系统	[80]

5 总结和展望(Conclusion)

本文综述了基于定性方法和半定性方法的故障检测与诊断技术.影响方法选择的主要因素是先验的系统信息.当我们无法建立定量模型时,定性方法是自然的选择.如果有可供利用的定量信息,那么我们就在定性方法的基础上引入定量信息,运用半定性方法,以改善诊断结果.

定性方法一般比较简单,容易构造模型.但由于只能得到定性描述,有时诊断结果显得过于粗糙,而且系统行为的组合爆炸问题是由定性方法自身造成的,无法解决,从而造成实用性差.

半定性方法是在定性方法的基础上,加入定量信息,将定性方法与定量方法相结合.它对系统的描述比定性方法更精确,可以部分地解决组合爆炸问题,因而实用性较强.但模型变复杂了,增加了建模和诊断的时间.

由于基于定性和半定性方法的故障诊断具有巨大的应用价值和广泛的实际需要,使得这项技术处于不断的发展中.以下是有待于进一步研究的课题.

——为了应用定性方法,如何将系统的定量信息定性化.

——如何在定性方法中加入定量信息,实现定性方法和定量方法的融合.

——加入定量信息是以模型复杂化和诊断时间变长为代价,但是否能改进诊断系统的性能值得研究.

——定量信息加入的时机,是在开始就加入,还是随着诊断的进行,信息的增多后再加入定量信息.

——在故障诊断中,系统的冗余行为是否可以避免?如何避免?如果不能避免,如何减少这些虚假行为.

——应用于容错控制,通过定性模型实时调整,重新确定控制器的参数.

基于定性和半定性方法的故障检测与诊断是实用性很强的技术,它是在实践中发展起来的,只有通过实践才能不断促进其自身的发展与完善.

参考文献(References)

[1] Patton J, Chen J, Nielsen S B. Model-based methods for fault diagnosis: some guide-lines [J]. Trans. of the Institute of Measurement and Control, 1995, 17(2): 73 - 83

[2] Frank P M. Analytical and qualitative model-based fault diagnosis—A survey and some new results [J]. European Journal of Control, 1996, 2(1): 6 - 28

[3] Frank P M, Koppen-Seliger B. New developments using AI in fault diagnosis [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1997, 10(1): 3 - 14

[4] Isermann R. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing [J]. Automatica, 1993, 29(4): 815 - 836

[5] Ye Y Z, Pan R F, Jiang W S. Fault detection and diagnosis methods for dynamic systems [J]. Information and Control, 1985, 15(6): 27 - 34

[6] Zhou D H, Ye Y Z. Modern Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000

[7] Beard R J. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization [R]. Cambridge, Massachusetts: Man Vehicle Lab, MIT, Report MVT - 71 - 1, 1971

[8] Mehra R K, Peschon J. An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamics [J]. Automatica, 1971, 7(5): 637 - 640

[9] Willsky A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems [J]. Automatica, 1976, 12(6): 601 - 611

[10] Frank P M, Ding S X, Koppen-Seliger B. Current developments in the theory of FDI [A]. 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS' 2000 [C]. Budapest, Hungary, 2000, 16 - 27

[11] de Kleer J, Brown J. A qualitative physics based on confluence [J]. Artificial Intelligence, 1984, 24(1/3): 7 - 83

[12] Kuipers B. Qualitative simulation [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 289 - 388

[13] Forbus K. Qualitative process theory [J]. Artificial Intelligence, 1984, 24(1/3): 85 - 168

[14] Williams B C. A theory of interactions: unifying qualitative and quantitative algebraic reasoning [J]. Artificial Intelligence, 1991, 51 (1/3): 39 - 94

[15] Williams B C. MINIMA: a symbolic approach to qualitative algebraic reasoning [A]. Proceedings AAAI-88 [C]. St. Paul, USA, 1988, 264 - 269

[16] Yip K. Underling complex dynamics by visual and symbolic reasoning [J]. Artificial Intelligence, 1991, 51(1/3): 179 - 222

[17] Iwasaki Y, Simon H A. Causality in device behavior[J]. Artificial Intelligence, 1991, 51(1/3): 11 - 38

[18] Kuipers B. Qualitative reasoning: modeling and simulation with incomplete knowledge [J]. Automatica, 1989, 25(4): 571 - 585

[19] Shi C Y, Chen J, Zhao Y, et al. Progress in qualitative reasoning [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1993, 6(2): 121 - 126

[20] Bai F Z, Huo X, Bao Z G. Qualitative reasoning for dynamic system: modeling and simulation [J]. Information and Control, 1995, 24(4): 222 - 229 (in Chinese)

[21] Kramer M A, Palowitch B L. A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph [J]. AIChE Journal, 1987, 33 (7): 1067 - 1078

[22] Kuipers B. Qualitative simulation as causal explanation [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1987, 17(3): 432 - 444

[23] Forbus K. Interpreting observations of physical systems [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1987, 17(3): 350 - 359

[24] Wennersten R, Narfeldt R, Granfors A, et al. Process modeling in fault diagnosis [J]. Computers and Chemical Engineering, 1996, 20 (Suppl.): 665 - 670

[25] Allen J. Maintaining knowledge about temporal intervals [J]. Communications of the Assoiation for Computing Machinery, 1983, 26 (11): 832 - 843

[26] Forbus K. Qualitative reasoning about physical processes [A]. Proc. 7th Int. Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. Vancouver, Canada, 1981, 326 - 330

[27] Forbus K. Interpreting measurement of physical systems [A]. Proc. 5th National Conference on Artificial Intelligence [C]. Philadelphia, USA, 1986, 113 - 117

[28] Iri M, Aoki K, O'Shima E, et al. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process [J]. Computers and Chemical Engineering, 1979, 3(1/4): 489 - 493

[29] Chang C C. On-line fault diagnosis using improved SDG [D]. Taipei, Taiwan: National Taiwan Institute of Technology, 1988

[30] Chang C C, Yu C C. On-line fault diagnosis using the signed directed graph [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1990, 29(7): 1290 - 1299

[31] Zhuang Z, Frank P M. Observation filtering: from qualitative simulation to qualitative observer [A]. 10th International Workshop on Qualitative Reasoning [C]. California, USA. 1996, 299 - 306

[32] Zhuang Z, Frank P M. Qualitative observer and its application to fault diagnosis [J]. Journal of Systems and Control Engineering (Proc. of Institution of Mechanical Engineers), 1997, 211(4): 253 - 262

[33] Zhuang Z, Frank P M. A fault detection scheme based on stochastic qualitative modeling [A]. IFAC World Congress'99 [C]. Beijing, China, 1999, 527 - 532

[34] Lichtenberg G, Lunze J. Observation of qualitative states by means of a qualitative model [J]. International Journal of Control, 1997, 66 (6): 885 - 903

[35] Lunze J, Schroder J. Application of qualitative observation and prediction to a neutralisation process [A]. IFAC World Congress'99 [C]. Beijing, China, 1999, 49 - 54

[36] Weld D. Comparative analysis [J]. Artificial Intelligence, 1988, 36 (3): 333 - 373

[37] Weld D. Use of aggregation in causal simulation [J]. Artificial Intelligence, 1986, 30(10): 1 - 34

[38] Weld D. Theories of comparative analysis [R]. Cambridge, MA: MIT AI Lab Technical Report, 1988

[39] Grantham S D, Ungar L H. Comparative analysis of qualitative

models when the model changes[J]. AIChE Journal, 1991, 37(6): 931 - 943

[40] Yamashita Y, Shoji S, Suzuki M. A fault-diagnosis system based on qualitative reasoning [J]. Int. Chemical Engineering, 1990, 30 (1): 151 - 159

[41] Oyeleye O O, Finch F E, Kramer M A. Qualitative modeling and fault diagnosis of dynamic process by MIDAS [J]. Chemical Engineering Communications, 1990, 96(1): 205 - 228

[42] Mavrovouniotis M L, Stephanopoulos G. Formal order-of-magnitude reasoning in process engineering [J]. Computers and Chemical Engineering, 1988, 12(9/10): 867 - 880

[43] Xia C D, Wang B W. A novel fault diagnosis approach of continuous systems[J]. Control and Decision, 1998, 13(4): 322 - 326 (in Chinese)

[44] Mihara K, Aono Y, Ohkawa T, et al. Stochastic qualitative reasoning and its application to diagnosis of air conditioning system [A]. Proc. of IEEE Industrial Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation'94 [C]. Bologna, Italy, 1994, 1401 - 1406

[45] Mihara K, Aono Y, Ohkawa T, et al. Diagnosis of an air conditioning system by stochastic qualitative reasoning [A]. Proc. of IEEE Symposium on Emerging Technologies & Factory Automation'94 [C]. Tokyo, Japan, 1994, 86 - 91

[46] Arimoto S, Mihara K, Aono Y, et al. Real-time stochastic qualitative simulation of large scale air conditioning system [A]. Proc. of IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics'95 [C]. Athens, Greece, 1995, 902 - 907

[47] Wang P, Masaki Y, Ohkawa T, et al. Stochastic qualitative simulation of heat source system [A]. Proc. of IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. Beijing, China, 1996, 2: 1414 - 1419

[48] Zhuang Z, Frank P M. Robust fault detection for nonlinear systems in the presence of unstructured uncertainties [A]. IFAC Workshop on On-Line-Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries [C]. Lyon, France, 1998

[49] Lunze J, Schiller F. An example of fault dianosis by means of probabilistic logic reasoning [J]. Control Engineering Practice, 1999, 7 (2): 271 - 278

[50] Lunze J. Process supervision by means of qualitative models [J]. Annual Reviews in Control, 2000, 24(1): 41 - 54

[51] Lunze J. Diagnosis of quantised systems [A]. 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes'2000 [C]. Budapest, Hungary, 2000.1: 28 - 39

[52] Zadeh L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338 - 353

[53] Shen Q, Leitch R. Integrating commonsense with qualitative simulation by the use of fuzzy sets [A]. Proc. 4th Int. Workshop on Qualitative Physics [C]. Lugano, Switzerland, 1990, 220 - 232

[54] Shen Q, Leitch R. Combining qualitative simulation and fuzzy sets [A]. Recent Advances in Qualitative Physics [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1992, 83 - 100

[55] Shen Q, Leitch R. Fuzzy qualitative simulation[J]. IEEE Trans. of Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(4): 1038 - 1061

[56] Shen Q, Leitch R. Diagnosing continuous dynamic systems by the use of qualitative simulation [A]. Proc. 3rd Int. Conference on Control [C]. Edingburgh, UK, 1991, 2: 1000 - 1006

[57] Pati S, Hofmann M O. Fuzzy qualitative diagnosis [A]. Proc. of the Int. Conference on Tools with Artificial Intelligence [C]. New Orleans, USA, 1994, 780 - 783

[58] Steele A D, Leitch R. Time-constrained qualitative model-based diagnosis [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1997, 10(5): 417 - 427

[59] Isermann R. On fuzzy logic applications for automatic control, supervision, and fault diagnosis [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1998, 28(2): 221 - 235

[60] Ozyurt I B, Hall L O, Sunol A K. SQFDiag: Semiquantitative model-based fault monitoring and diagnosis via episodic fuzzy rules [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1999, 29 (3): 294 - 306

[61] Hofmann M O. Model-based diagnosis directed by heuristic search [A]. Proc. 9th Conf. on Artificial Intelligence for Applications [C]. Orlando, USA, 1993, 197 - 203

[62] Yu C C, Lee C. Fault diagnosis based on qualitative/quantitative process knowledge[J]. AIChE Journal, 1991, 37(4): 617 - 628

[63] Han C C, Shih R, Lee L. Quantifying signed directed graphs with the fuzzy set for fault diagnosis resolution improvement[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1994, 33(8): 1943 - 1954

[64] Wang X Z, Yang S A, Veloso E, et al. Qualitative process modeling—A fuzzy signed directed graph method [J]. Computers and Chemical Engineering, 1995, 19(Suppl.): 735 - 740

[65] Wang X Z, Yang S A, Yang S H, et al. The application of fuzzy qualitative simulation in safety and operability assessment of process plants [J]. Computers and Chemical Engineering, 1996, 20(Suppl.): 671 - 676

[66] Tarifa E E, Scenna N J. Fault diagnosis, direct graphs, and fuzzy logic [J]. Computers and Chemical Engineering, 1997, 21(Suppl.): 649 - 654

[67] Dubois D, Prade H. Fuzzy Set and Systems: Theory and Application[M]. Orlando, FL: Academic Press, 1980

[68] Kay H, Rinner B, Kuipers B. Semi-quantitative system identification [J]. Artificial Intelligence, 2000, 119(1/2): 103 - 140

[69] Chang I C, Yu C C, Liou C T. Interval arithmetic approach to qualitative physics: static systems [J]. Int. Journal of Intelligence System, 1993, 8(3): 405 - 430

[70] Benkhedda H, Patton R J. Fault diagnosis using quantitative and qualitative knowledge integration [A]. UKACC Int. Conference on Control'96 [C]. Exeter, UK, 1996, 849 - 854

[71] Leitch R, Freitag H, Struss P, et. al. ARTIST: a methodological approach to specifying model based diagnostic systems [A]. In: Guida G, Stefanni A. Industrial Applications of Knowledge-Based Diagnosis [M]. New York: Elsevier, 1992, 265 - 289

[72] Bai F Z, Fang J, Zhang W M. A survey on the application of qualitative simulation in foreign countries [J]. Journal of System Simulation, 1997, 10(4): 1 - 7

(下转第 666 页)

1985, 6(12):576 - 583

[41] Lee B K, Sung S W, Chun H D, et al. Automatic control for DO and pH in the activated sludge process in a coke wastewater treatment plant [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(12):141 - 148

[42] Cheruy A, Panzarella L, Denat J P. Multimodel simulation and adaptive stochastic control of an activated sludge process [A]. Proc. of Modelling and Control of Biotechnical Processes [C]. Finland, 1982, 127 - 133

[43] Barros P R, Carlsson B. Iterative design of a nitrate controller using an external carbon source in an activated sludge process[J]. Water Science and Technology, 1998,37(12):95 - 102

[44] Tsai Y P, Ouyang C F, Chiang W L, et al. Construction of an on-line fuzzy controller for the dynamic activated sludge process [J]. Water Research, 1994,28(4):913 - 921

[45] Tsai Y P, Ouyang C F, Chiang W L, et al. Effluent suspended solid control of activated sludge process by fuzzy control approach[J]. Water Environment Research, 1996, 68(6):1045 - 1053

[46] Chang W C, Ouyang C F, Chiang W L, et al. Sludge pre-recycle control of dynamic enhanced biological phosphorus removal system: an application of on-line fuzzy controller [J]. Water Research, 1998,32(4):727 - 736

[47] Tong R M, Beck M B, Latten A. Fuzzy control of the activated sludge wastewater treatment process [J]. Automatica, 1980,16(3): 695 - 701

[48] Manesis S A, Sapidis D J, King R E. Intelligent control of wastewater treatment plants [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(2):275 - 281

[49] Nam S W, Myung N J, Lee K S. On-line integrated control system for an industrial activated sludge process [J]. Water Environment Research, 1996,68(1):70 - 75

[50] Ferrer J, Rodrigo M A, Seco A, et al. Energy saving in the aeration process by fuzzy logic control [J]. Water Science and Technology, 1998,38(3):209 - 217

[51] Kalker T J J, van Goor C P, Roeleveld P J, et al. Fuzzy control of aeration in an activated sludge wastewater treatment plant: Design, simulation and evaluation [J]. Water Science and Technology, 1999,39(4):71 - 78

[52] Syu M J, Chen B C. Back-propagation neural network adaptive control of a continuous wastewater treatment process [J]. Industrial Engineering Chemistry Research, 1998,37(12):3625 - 3630

[53] Ohtsuki T, Kuwazoe T, Masui T. Intelligent control system based on blackboard concept for wastewater treatment process[J]. Water Science and Technology, 1998,37(12):77 - 85

本文作者简介

杜树新 1967年生.副研究员.分别于1989年,1992年,1995年在江苏理工大学,西安交通大学,西北工业大学获学士,硕士和博士学位,1995 ~ 1997年在浙江大学从事博士后研究工作,1997年留校任教至今.主要研究方向为自适应控制,分散控制,污水处理过程建模与控制. Email:shxdu@iipc.zju.edu.cn

(上接第659页)

[73] Bousson K, Steyer J, Trave Massuyes L, et al. From a rule-based to a predictive qualitative model-based approach using automated model generation [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998,11(4):477 - 493

[74] Miline R, Trave-Massuyes L. Real-time model based diagnosis of gas turbines [A]. Proceedings of the 8th Int. Conference on Applications of Artificial Intelligence in Engineering [C]. Toulouse, France, 1993,2:265 - 278

[75] Milne R, Nicol C, Ghallab M, et al. TIGER: Real-time situation assessment of dynamic systems [J]. Intelligent Systems Engineering, 1994,3(3):103 - 124

[76] Leyval L, Ledoux A. Qualitative simulation for supervision of a nuclear reprocessing plant [A]. IFAC/IMACS Symposia on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS'91 [C]. Baden-Baden, Germany, 1991,523 - 527

[77] Leyval L, Montmain J, Gentil S. Qualitative analysis for decision making in supervision of industrial continuous processes [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1994, 36(2):149 - 163

[78] Leyval L, Gentil S, Feray-Beaumont S. Model-based causal reasoning for process supervision [J]. Automatica, 1994,30(8):1295 - 1306

[79] Lackinger F, Nejdel W. Integrating model-based monitoring and diagnosis of complex dynamic systems [A]. Proc. of the 12th Int. Conference on Artificial Intelligent [C]. Sydney, Australia, 1991, 2:1116 - 1122

[80] Forstner D, Lunze J. Qualitative model-based fault detection of a fuel injection system [A]. 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes'2000 [C]. Budapest, Hungary, 2000,1:28 - 39

本文作者简介

王文辉 1975年生.1999年7月于清华大学获学士学位,目前为清华大学博士研究生.研究方向:故障诊断,定性推理. Email: wangwenhui99@mails.tsinghua.edu.cn

周东华 1963年生.1990年于上海交通大学获博士学位,目前为清华大学教授,博士生导师,中国自动化学会副秘书长,技术过程的故障诊断与安全性专业委员会秘书长.研究方向:动态系统的故障诊断与容错控制.