

关于智能诊断中模型的构建和应用^{*})

姜云飞 范昭赋

(中山大学计算机软件研究所 广州 510275)

摘要 在基于模型的诊断中,模型起着关键性的作用,模型的质量直接影响诊断的准确度和诊断的效率,因此诊断模型也成为人工智能研究者普遍关注的热点问题。本文对基于模型的诊断方法和该领域的最新研究成果做了全面的综述,重点介绍了构建诊断模型方面的研究成果,其中包括分级结构抽象方法、基于状态转换的历程重构方法、依赖于任务的定量抽象方法以及利用过程代数的描述方法等。此外,本文还对诊断模型的构建的研究提出了自己的观点和建议。

关键词 智能诊断,基于模型的诊断,模型构建

Construction and Application of the Models in Model-Based Diagnoses

JIANG Yun-Fei FAN Zhao-Fu

(Institute of Computer Software, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Abstract In model-based diagnoses, the models act as very important roles, which qualities effect the precision and efficiency of diagnosis so much that diagnosis model research becomes a hot problem for the AI researchers. Model-based diagnosis methods and some new research results in the field are completely summarized, Especially, the research results about models construction in diagnosis are mainly introduced, which include Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction, History reconstruction based on state transitions, Task-dependent qualitative domain abstraction and Model-based diagnosis based on process algebras, etc. Furthermore, some new ideas about the diagnosis model construction are proposed.

Keywords Intelligence diagnosis, Model-based diagnosis, Model construction

1 引言

智能诊断是人工智能研究中的一个重要领域。这个研究领域自 20 世纪 70 年代初开始形成^[1],在最近 30 年取得了飞速的发展。因为具有广泛的实用性,受到各方面研究者的重视,至今仍是人工智能中十分活跃的领域。智能诊断系统从本质上来说是基于知识的系统,诊断系统的质量主要依赖于所使用的知识库的质量。从所使用的知识库的类型来说,智能诊断系统可以分成两类:一类是基于经验的诊断系统,另一类是基于模型的诊断系统。

基于经验的诊断系统使用的是经验知识。什么是经验知识?就是可以根据系统的表现直接得出故障或可能故障的结论,这是从经验中得出的。而基于模型的诊断系统,使用的是关于模型本身的知识,它是通过对模型的观察和预期输出的差异,并根据模型的内部结构和行为通过计算和推理演算来判断哪个部件或哪些部件是异常的。

早期的智能诊断是专家系统中关于人类疾病的诊断^[1],美国斯坦福大学的 MYCIN 系统是这类诊断系统的先驱和代表。此后,人们又研制了各种各样的诊断专家系统。这类系统都是基于经验的诊断系统,系统的知识库存储的是专家关于诊断领域的知识。为研制这类系统,人们需要把专家知识收集起来,转换成计算机能够使用的形式。诊断的输入信息是病人的症状和化验结果,诊断的结果是指出待诊断对象可能患有的某种疾病,给出治疗意见。

电子、电器、软件等产品的故障诊断在诊断时所依据的知识上与诊断的目标上与上述的诊断有很大的不同。为解决这类产品的智能诊断问题,Reiter 提出了基于模型的诊断^[2],以后的许多研究者又做了大量的后续研究工作^[3],使其成为人工智能的一个热门研究方向。这类系统的知识库主要使用系统的结构性知识,也就是关于待诊断系统的组成、系统各元件的功能、各元件之间的连接知识。诊断系统的主要思想是:利用系统的结构性知识构建出系统的模型。在给定系统输入的情况下,系统的模型会产生预期的输出。如果这个预期的输出与观察到的实际系统的输出不同,则提出了诊断问题。诊断的目的是找出那些可能有毛病的元件,然后通过更换有毛病的元件来修复系统。基于模型诊断,又可细化为诊断的产生、诊断的测试和诊断的鉴别等步骤。

值得注意的是,模型是一个很广义的概念。关于系统的结构模型称为模型,而关于系统的故障模型也可以称为模型,但两者是截然不同的;后者的故障模型实际使用的还是基于经验的知识,它描述的是系统的表现直接到它的故障结论(不是通过系统描述推理得到的,而是凭经验得到的)的一个基于经验的推理模型,不是关于系统本身结构知识的。有一些学者将基于故障模型的诊断,如故障决策树模型等也归到基于模型的诊断,这是不严格的。本文所说的基于模型的诊断均特指基于系统结构模型的诊断,这与国际上公认的基于模型的诊断的定义也是相符的。以下所讨论的模型都是关于系统结构性知识的模型。

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(69873047)。姜云飞 教授,博士生导师,主要研究领域:人工智能,智能规划;范昭赋 博士生。

2 基于模型的诊断

2.1 基于模型的诊断的定义

基于逻辑的模型诊断方法中,不仅用一阶逻辑来表示目标系统的结构和行为,还用它来表示刻画特定诊断问题的观察集。这里的模型是指目标系统的表示,而不是指逻辑上的关于一组公式的可满足的解释。这种基于逻辑的方法的一个前提条件是:模型能够正确描述目标系统的结构和行为,或者故障的因果关系。从逻辑的角度上,可以将“诊断”认为是对所观察到的行为的一种“解释”。目前主要有两大类关于这种“解释”的概念:一类是基于逻辑一致性的概念(基于一致性的诊断),一类是溯因的概念(溯因诊断)。

基于一致性的诊断(Consistency-based diagnosis)是 Reiter 1987 年首次提出的^[4]。该方法用一阶逻辑子句的集合 SD 表示目标系统的描述,SD 包含了刻画系统部件间的连接关系的公理集和描述每一个部件行为的公理集。用谓词 $ab(c)$ 表示部件是异常的,那么对于部件 c 的正确行为必须加上一个前件 $\neg ab(c)$,即用蕴含式 $\neg ab(c) \rightarrow Output = f(Inputs)$ 来表示部件 c 的正确行为。用观察集 OBS 表示系统的异常行为。在假定所有部件都正常工作,如果 OBS 与 SD 不一致,就意味着观察行为与预期行为之间有差异。一个诊断就是这样的一个关于部件的集合 Δ ,在该集合内的部件是异常,而其他部件都是正常的情况下,观察 OBS 和系统描述 SD 是一致的。设系统的所有部件的集合为 COMPS,则形式化描述如下:

定义 1^[4] 设 $\Delta \subseteq COMPS$,关于 (SD, COMPS, OBS) 的基于一致性诊断为 $D(\Delta, COMPS - \Delta)$,使得 $SD \cup OBS \cup \{D(\Delta, COMPS - \Delta)\}$ 是一致的。

溯因推理是指在某个域给定的事件集合中产生一个解释的过程。溯因诊断起源于一个基于疾病和症状的因果模型的医疗诊断方法。将这种方法推广到基于逻辑公式的器件的诊断上后,模型 T 就是指包含了那些描述故障因果关系的公理。故障对应于一个特定的表征或假设的集合。Poole 首先给出了溯因诊断的定义。

定义 2^[5] 设 E 是一个极小的关于故障原因的假设集合, T 是系统的模型, OBS 是观察集。我们称 E 是一个溯因诊断,当且仅当 $E \cup T$ 是一致的,且 $E \cup T \Rightarrow OBS$ 。

为了将基于一致性的诊断和溯因诊断统一起来,将故障产生原因的假设集也用非正常部件的集合 Δ 表示,模型用 SD 表示,Reiter 对溯因诊断给出了新的定义。

定义 3^[4] 设 $\Delta \subseteq COMPS$,关于 (SD, COMPS, OBS) 的溯因诊断为 $D(\Delta, COMPS - \Delta)$,使得 $SD \cup \{D(\Delta, COMPS - \Delta)\}$ 是一致的,且 $SD \cup \{D(\Delta, COMPS - \Delta)\} \Rightarrow OBS$ 。

Console 和 Torassi 将定义 1 和定义 3 统一起来,建立了一个基于模型的诊断的定义谱系。

定义 4^[6] 设 $O' \subseteq OBS, \Delta \subseteq COMPS$,称 $D(\Delta, COMPS - \Delta)$ 为关于 (SD, COMPS, OBS) 的基于模型的诊断,当且仅当

(1) $SD \cup OBS \cup \{D(\Delta, COMPS - \Delta)\}$ 是一致的。

(2) $SD \cup \{D(\Delta, COMPS - \Delta)\} \Rightarrow O'$ 。

从以上定义可以看出,当 O' 从 ϕ 到 OBS 变化时,可得到从基于一致性诊断到溯因诊断一系列不同的逻辑定义。由此可见,溯因诊断对诊断空间的限制最强,即要求所有观测被逻辑推出;而基于一致性的诊断限制最弱,即不要求任何观测被逻辑推出。

2.2 基于模型的诊断的优点

基于模型诊断是智能诊断在思想上的一个大的突破,它的优点是:

(1) 智能诊断是依赖知识的系统,而基于经验的诊断仅仅使用了专家的知识,缺乏对系统结构描述的知识。这些知识在某些诊断中占有十分重要的地位。在缺乏这些知识的情况下,无论我们对基于经验的诊断系统做何种改进,都不会对诊断系统的质量有显著的提高。因此,基于模型的诊断是我们在提高诊断系统质量时必须认真考虑的有效途径。

(2) 基于经验的诊断类似于中医的诊断,基于模型的诊断类似于西医的诊断。在中医的诊断中,医生的诊断全凭经验,医生不考虑人的身体结构,不考虑人体各器官的功能和连接,因此也就无法像西医那样对病人做手术治疗,例如换心、换肾等手术。对于基于经验的诊断,特别是医学诊断系统来说,其诊断的一个重要目的是为诊断的对象(病人)开出药方,病人在服用了开出的药方之后,改善了生理的运行机理,恢复了健康。而对于电子、电器、软件产品来说,这种诊断的思路是不适用的。对电子、电器产品来说,诊断的目的是找出有毛病的元件,然后更换这些元件,使系统恢复正常工作。这类诊断需要大量的关于系统结构的知识,而模型就是对系统结构性知识的描述。

(3) 当前,电子、电器、软件等产品的更新换代步伐非常迅速,这类产品的生命周期一般都很短。而基于经验的诊断主要依赖于专家知识,专家知识的形成、总结和积累需要一个较长的过程。等到专家知识积累起来,再依据这些知识研制出诊断系统,它所诊断的产品可能已经淘汰了,或者已经过时了。而对基于模型的诊断而言,只要有了系统的设计,就可以从设计中抽取系统的模型,把系统的模型嵌入到诊断系统中,就可以形成对新产品的诊断系统。于是,在新产品推向市场的同时,产品的诊断软件系统就可以同时开发并投入使用。

(4) 基于模型的诊断依据待诊断系统的结构知识,其诊断结果是指出那些功能上有问题的元件,对系统故障能给出合理的解释,有利于系统的修复。

2.3 基于模型的诊断面临的问题

虽然基于模型的诊断有许多优点,作为人工智能研究的一个新的领域,它也面临一些新问题和挑战,期待着我们去解决。现在这个领域存在的问题是:

(1) 模型的构建问题

选择合适的模型是基于模型的诊断的关键。这是因为,如果模型正确,那么观测和预言行为之间的所有差异都是源于设备的故障部件,并且通过沿着具有因果关系的路径往回跟踪,一定能找到故障部件。但从理论上讲,模型永远是不完备的,它只是设备的近似,因此必须在复杂性和完备性之间进行权衡。要想完备,诊断推理必须沿着每一个可能的相互作用路径考虑所有可能出错的东西。但这种推理无疑复杂性高。为此,必须作出某些简化假设(比如,忽略某些路径),但这样就要失去完备性。因为有可能故障正出在被忽略的路径上,这样系统就永远不会诊断出该类故障部件。因此,有待解决的问题是找到能帮助我们选择、组织简化假设的一般性准则。比如,一些应用指出虽然定性模型很有用,但某些形式的定量推理也很重要,尤其是在故障检测和诊断辨别阶段。因此,研究定性和定量推理(或半定量推理)的结合是很重要的。

(2) 动态系统诊断问题

复杂性尤其体现在具有动态行为的设备中,在模型化、预

测机制、推理机制上都需比诊断简单的静止设备复杂得多。对动态设备诊断方面的研究虽然有了一定的成果,但这些工作主要集中于从模型化角度减少行为预测的复杂性——动态设备诊断的一个主要困难。然而,还存在其它的困难,如可能得不到辨别诊断所需的足够信息;如何选择合适的探测点;如何处理相互依赖的故障等至今,动态设备的诊断仍是基于模型诊断领域有待研究的问题之一。

(3) 复杂系统的诊断效率问题

基于模型的诊断对于大型复杂系统,诊断范围太大,给诊断鉴别造成了困难,诊断效率偏低,使得基于模型的诊断还很难投入到实际使用。

(4) 难以利用不确定性知识和经验知识的问题

在诊断中不能使用经验知识,使诊断的知识在经验方面有很大缺陷;在诊断中不能使用不确定知识;诊断的精度不够,诊断的结果给出一些怀疑是有毛病的元件集合(诊断),但是给出的诊断集合一般说来都比较多,又没有一个是可靠性度量对这些诊断集合加以区别,增加了后面的诊断鉴别的难度,给用户修复造成了困难。

(5) 领域独立性问题

基于模型的诊断是独立于设备的。我们所做的任何一件事都不是针对某一特定的设备。比如,只要给出一个不同电路的新描述,可马上使用同样的推理过程。然而,我们对于这些技术有多大程度的领域独立性却不很清楚。VMBD项目的成功已揭示出要想在新的应用领域使用VMBD技术,需要研究者和使用者双方的共同努力、相互理解和相互协调,还需要AI其它领域研究者的合作。

3 关于模型构建的研究成果

在基于模型的诊断中,模型起着十分关键的作用。模型是实际系统的描述,也是实际系统的概括和抽象。模型应能抓住实际系统的本质。如果模型构建得不好,则不但会降低诊断系统的效率,而且不能确切指出系统故障之所在,造成诊断的失败。在基于模型的诊断的30多年的发展历程中,研究者提出了各种各样的模型。下面,我们介绍在基于模型诊断研究领域构建模型方面的重要方法以及各种方法的优缺点。

3.1 分级结构抽象方法(Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction)

Reiter^[2]的工作为基于模型的诊断提供了一个漂亮的公式化框架,为基于模型的诊断奠定了坚实的理论基础。20世纪80年代,很多研究者循着他的方向开展研究工作,取得很多有用的研究结果,推动了基于模型诊断的发展。但是,人们也很快发现,基于模型诊断的计算复杂性与待诊断系统的元件数量有极为密切的关系。当系统较为复杂、元件数量很多时,诊断计算的复杂性急剧上升,导致诊断无法进行。为减少诊断计算复杂性,人们自然地想到把系统分成若干个组,先按组做出诊断,然后对确定的组再诊断到元件。但是,Luca Chittaro 和 Roberto Ranon^[7]经认真研究后指出,这种简单的抽象方式对诊断效率的改进并不是总有作用,有时甚至是起反作用。于是他们提出分级结构抽象的思想^[7~9],其核心是给出构建诊断模型中关于抽象过程的概念,然后把简单的诊断模型抽象问题转换为在多个抽象诊断模型中选取“最优”诊断模型的问题,给出了判断诊断模型优劣的准则,力求在诊断过程中选用“最优”诊断模型,提高诊断的效率。他们还给出了自动产生“最优”诊断模型的算法。由于在诊断过程中采用

了“最优”模型,这种方法的诊断效率要比传统的诊断方法高出许多。他们在含有水泵和管线的供水系统的实验诊断中证明了这种方法是十分有效的。这种方法的缺点是选用“最优”诊断模型过程中会产生过多的候选模型,影响效率。

3.2 基于状态转换的历程重构方法(History reconstruction based on state transitions)

针对 Reiter 提出的经典模型只能处理静态模型的缺点, P. Baron^[10] 等人 and P. Struss^[11] 提出了一种描述动态系统的模型。这种模型的主要思想是:把整个系统划分为若干个模块,不再详细地考虑模块的结构部分(包括元件和其间的连接),只考虑模块的行为及其相互作用,用有限状态自动机表示模块所能产生的所有状态,用状态间的弧表示激发状态转换的事件,转换结果和转换过程发出可供观察的信息。这种模型的诊断问题的实质是:给定模型的初始状态和一个观察到的信息序列,如何给出一个激发状态转换的事件序列(history, 历程),使描述待诊断系统的有限状态自动机在这个事件序列的激发下运转,在运转时观察到的信息就是给定的信息序列(这个过程也称为历程重构, history reconstruction), 于是,在给定的信息序列中有出错信息时,用重构的历程就可以获得诊断。这种方法的优点是对系统从宏观上加以控制,可以诊断大型随时间变化的动态系统。P. Baron^[10] 等人用这种方法诊断电力传输系统,取得较好的效果。L. Console, C. Picardi^[9] 等人把这种方法用于汽车引擎的在线诊断。这种方法的缺点是其诊断的定义与经典的诊断定义差别很大,对系统的描述较粗。另外,因为不是基于逻辑的模型,无法在诊断中实行推理。

3.3 依赖于任务的定量抽象方法(Task-dependent qualitative domain abstraction)

M. Sachenbacher 和 P. Struss^[12] 等人认为之所以效率太低,是源于描述实际系统的模型“过细”,未能抓住系统本身的特点,不适应诊断的要求。这种“过细”,不但降低了系统的效率,实际上很多描述也无必要。他们提出在系统参量的关系约束框架的基础上,依据系统的输入可以观察到的输出,以及系统的诊断任务,重新对实际系统进行定量抽象。这种抽象在能够描述系统行为的情况和满足任务要求的前提下,应尽可能地粗。这种方法在系统的定量描述和定性描述之间架起桥梁,可以在不考虑抽象级别的情况下表达元件间的行为知识。M. Sachenbacher 和 P. Struss 等人把他们的方用在欧洲汽车生产和供应公司的一个汽车引擎的故障诊断中,诊断效率得到明显提高。这种方法的缺点是需要较多的领域知识,模型构建过程复杂。

3.4 利用过程代数描述方法(Model-based diagnosis based on process algebras)

1987年, Reiter 最早提出基于模型诊断的概念时使用一阶逻辑语句来描述模型。此后,大多数研究者也都遵循这个思路,使用一阶逻辑描述,只是在诊断的产生算法上加以改进。然而, L. Console, C. Picardi, M. Ribaud^[13] 等人却另辟蹊径,用过程代数(process algebras)来描述诊断。过程代数是一种强有力的模型描述语言,在计算机科学的几个领域都有广泛的应用。其实质是利用系统的可分解性,来描述各类实际系统的模型,包括那些随时间而变的动态模型。过程代数用表达式描述系统,它以递归的方式把系统分解成若干个子系统,各子系统通过动作、运行方式和连接方式组合在一起。Console 等人使用过程代数重新给出了诊断的形式定义,并且

证明了他们的定义与传统的使用逻辑描述的溯因定义是完全等价的。他们的工作充分利用了过程代数描述过程和结构能力强的特点,能处理动态系统的诊断,有许多现成的软件工具可以使用。他们把这种方法用在离心水泵系统的诊断中。这种方法的缺点是模型的描述不够直观,过于繁琐,建模的工作量很大。

结论和展望 综上所述,可以看到基于模型的诊断方法在近几年的发展情况还是很可喜的。关于诊断模型的构建问题已经成为基于模型的诊断的核心问题,这也是基于模型的诊断能从理论分析走向实际应用的关键问题。现在,基于模型的诊断已应用于很多不同的领域。除了电路故障查找系统和医学诊断系统外,基于模型的诊断已经向更实用化的方向发展,如大型 VHDL 程序的故障检测与定位、大型异步离散事件系统的诊断、网络通讯故障诊断、汽车故障诊断、燃气轮机监视等。

最近几年,许多学者将基于模型诊断方法应用于汽车诊断上,这是一个很有前途且富有挑战性的领域。Mosterman 等在 1998 年提出了诊断雪佛兰发动机的方法,在 VMBD 项目进行过程中设计出了 RAZ'R,它是一个模型化和诊断的开发和运行环境,已被保时捷和沃尔沃采用。VMBD 项目的目标就是将基于模型的诊断技术既应用于在生产车间内的汽车,又应用于正在行驶的汽车。它是一个欧盟基金项目,合作者包括汽车制造商、供应商和大学。这一项目推动了基于模型诊断的发展,使得生产商和供应商有机会来考察基于模型的诊断技术。

我国也有一批学者从事这方面的研究。如清华大学应明生^[14]研究了诊断知识库语义说明,以及在诊断知识库的转换和合并后如何为新的诊断知识库构造新的合适的诊断方法问题。他的研究成果发表在国际顶级人工智能杂志《Artificial Intelligence》上,这也是近年来我国在人工智能领域最高水平的研究成果。中国科学院软件研究所的刘剑和林惠民^[15]研究了诊断信息的自动生成问题。吉林大学的欧阳丹彤和李占山^[17,18]研究了各种诊断关系和诊断分解问题。本文作者也带领一些博士生在从事这方面的研究课题,完成了两个有关基于模型的诊断的国家自然科学基金项目,在极小碰集的求解方法、诊断方法以及程序诊断等方面发表了一系列的研究成果。

智能诊断中,基于经验的诊断只使用专家的经验知识,其诊断质量很难得到突破性进展;而基于模型的诊断只使用系统的结构性知识,其诊断效率很难大幅度提高。我们认为,无论是经验性知识,还是结构性知识,都是诊断知识库的重要组成部分。只强调和使用一个方面的知识,而忽略另一个方面的知识,都会对诊断的质量和效率产生影响。只有两方面结合,才会产生理想的效果。因此,研究如何将经验知识(专家知识)融入模型的描述中,或者融入基于模型的诊断推理过程中,具有重要意义。如果能提出一种既可以使用系统的结构知识,又能使用经验知识的诊断模型,将会使诊断系统在性能上有一个较大的突破。

如何在模型中将定性的推理和定量推理(或半定量推理)相结合也是一个新的研究课题。现阶段一般研究的都是定性的模型。由于谓词逻辑的表达能力的限制,很难把定量的关系在模型中进行表示。这样的模型就不可能精确地表现实际

的系统,使得诊断结果可能发生错误。如果能将定性的推理和定量推理(或半定量推理)结合起来,势必提高模型的表达能力,也能对诊断结果有较大改善。我们可以将模糊逻辑和模糊推理加入诊断推理过程中,改善诊断产生算法的效率和质量。

另外,诊断系统的模型描述因为不可能是完备的,是否可以考虑一个可以具有自学习、自修正能力的系统呢?那么这样的系统必然具有一些能够通过学习收敛的调整因子。这些调整因子可以通过对诊断测试例的学习使得模型更加接近实际系统。还有一些学者提出了将模糊理论用于诊断模型的构建中。由于经验知识具有一定的模糊性,可望通过模糊理论将经验知识和结构知识更好地结合起来,以提高系统的表达能力和诊断能力。

参 考 文 献

- 1 Shortliffe E. H. Computer-Based Medical Consultation; MYCIN. New York: Elsevier, 1976
- 2 Reiter R. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 1987, 32(1): 57~95
- 3 de Kleer J, Mackworth M K, Reiter R. Characterizing diagnoses and systems. *Artificial Intelligence*, 1992, 52: 197~222
- 4 de Kleer J, Mackworth A K, Reiter R. Characterizing diagnosis and systems. *Artificial Intelligence*, 1992, 56(2-3): 197~222
- 5 Poole D. Normality and faults in logic-based diagnosis. In: *Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Detroit MI, 1989, 1304~1310
- 6 Console L, Torasso P. A spectrum of logical definitions of model-based diagnosis. In: Console W H L, de Kleer J, eds. *Readings in Model-Based Diagnosis*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1992, 78~87
- 7 Chittaro L, Ranon R. Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction. *Artificial Intelligence*, 2004, 155: 147~182
- 8 Autio K, Reiter R. Structural abstraction in model-based diagnosis. In: *Proceedings of the Thirteenth European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-98)*. Brighton, UK, Wiley, New York, 1998, 269~273
- 9 Chittaro L, Ranon R, Soldati A. Introducing deviations and multiple abstraction levels in the functional diagnosis of fluid transfer systems. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1998, 12: 355~373
- 10 Baroni P, Lamperti G, Pogliano P, et al. Diagnosis of large active systems. *Artificial intelligence*, 1999, 110: 135~183
- 11 Struss P. Fundamentals of model-based diagnosis of dynamic systems. In: *Proc. IJCAI-97*, Nagoya, Japan, 1997, 480~485
- 12 Sachenbacher M, Struss P. Task-dependent qualitative domain abstraction. *Artificial Intelligence*, 2005, 162: 121~143
- 13 Console L, Picardi C, Ribaudo M. Process algebras for systems diagnosis. *Artificial Intelligence*, 2002, 142: 19~51
- 14 Ying Mingsheng(应明生). Knowledge transformation and fusion in diagnostic systems. *Artificial Intelligence*, 2005, 163: 1~45
- 15 刘剑, 林惠民. 传值进程模型检测中诊断信息的生产. *软件学报*, 4(1): 1~8
- 16 李占山, 等. 基于模型诊断问题的分解及其算法. *计算机学报*, 2003(9): 1171~1176
- 17 欧阳丹彤, 姜云飞. 基于一致性的中心诊断及中心溯因诊断. *计算机学报*, 1998(6): 540~545