ISSN1000-9825 Journal of Software 软件学报 2000,11(7):979~983

对基于模型诊断测试理论的修正与扩充*

李占山[1] 姜云飞[2]

[1](吉林大学计算机科学系 长春 130023)

[2](中山大学计算机软件所 广州 510275)

E-mail: zsli@public.cc.jl.cn

摘要 虽然McIlraith和Reiter对基于模型诊断的测试进行了阐述,但他们的工作限定条件过于严格.该文放宽了相关测试定理的限定条件,给出了修正后的相关测试定理及其证明.作为对McIlraith工作的推广,对鉴别诊断原理的测试条件进行了扩充,提高了鉴别测试的适应性.

关键词 候选诊断,判定测试,相关测试,鉴别测试,测试条件.

中图法分类号 TP306

基于模型诊断(model-based diagnosis)是人工智能领域近年来发展起来的一个十分活跃的研究分支,其研究动机是希望克服第一代诊断专家系统的缺陷.70年代中期到80年代中期为此项研究的开创性时期,之后逐渐发展成为一种全新的诊断方法,被一些人工智能专家誉为诊断理论和技术上的革命.根据基于模型诊断理论,我们能够对诊断系统建立起系统模型 Σ(背景理论)及其预期的行为,如果观测到的系统行为OBS(observations)与预期的系统行为不符,那么我们就能利用已建立的系统模型,从逻辑上推导出所有可能的候选诊断[1~4].然而,通过上述方法获得的候选诊断可能会有很多,为此我们就必须对系统进行一系列的测试,以帮助故障检修人员从候选诊断空间中找出真正的故障元件集合,这就是诊断测试理论.在过去的十几年里,人们对基于模型的诊断做了广泛而深入的研究,提出了大量新颖而有意义的思想和方法,但对诊断测试理论的研究却比较少.1992年McIlraith和Reiter[5]对假设推理的测试进行了系统的研究,并取得了一定效果.但他们的工作对相关测试定理的限定过于严格,并且对鉴别诊断测试的测试条件进行限制,降低了鉴别测试的适应性.本文在满足相关测试定义要求的情况下,放宽了相关测试定理的限定条件,并且把鉴别诊断测试条件从 *true* 推广到不影响元件状态的任何可满足的 A,能够提高诊断测试的适应性,并在一定条件下可降低测试成本,提高效率.

1 相关工作

这里,假定 Σ 是有关诊断系统背景知识描述的一阶命题集合,HYP(hypotheses)是我们目前所获得的有关该系统的可能的诊断集合,H 是一个 ab-文字合取式,是 HYP 中一个可能的诊断.

定义1(测试)[5]. 一个测试是一个偶对(A,O),其中 A 是可获得(achievable)文字的合取,O 是可观测的.

定义2(测试结果)[5]. 测试(A,O)的结果是 O,$\neg O$ 之一.

定义3(支持,否定)[5]. 测试(A,O)的结果 α 支持(confirms)$H\in HYP$ iff $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足且 $\Sigma\wedge A\models H\supset\alpha$. α 否定(refutes)$H\in HYP$ iff $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足且 $\Sigma\wedge A\models H\supset\neg\alpha$.

定理1[5]. 测试(A,O)的结果 α 支持(否定)$H\in HYP$ iff

(1) Σ 有一个形如 $\neg A'\vee\neg H'\vee\alpha(\neg A'\vee\neg H'\vee\neg\alpha)$ 的本原蕴涵式(prime implicates),其中 A' 是 A 的子合取式,H' 是 H 的子合取式;

---

* 本文研究得到国家自然科学基金(Nos. 69783009,69873047,69903005)资助.作者李占山,1966年生,博士生,主要研究领域为基于模型的诊断,智能决策.姜云飞,1945年生,教授,博士生导师,主要研究领域为自动推理,基于模型的诊断及规划.

本文通讯联系人:李占山,长春 130012,长春市宽平大路北一胡同26-1号501#

本文1999-05-07收到原稿,1999-07-11收到修改稿

(2) 对所有的 $H\in HYP$,Σ 没有本原蕴涵式包含(subsumes)$\neg A\vee\neg H$.

定义 4(判定测试)[5]. 测试(A,O)是对假设空间 HYP 的一个判定测试 iff 对所有 $H\in HYP$,$\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足且存在 $H_i,H_j\in HYP$ 使得测试(A,O)的结果 α 或者否定 H_i,或者否定 H_j,而不管测试结果如何.

定理 2[5]. 假定 Σ 至少有两个形如 $\neg A'\vee\neg H'\vee O$ 和 $\neg A''\vee H''\vee\neg O$ 的本原蕴涵式,其中

(1) H' 和 H''分别是对某 $H_i,H_j\in HYP$ 的子合取式;

(2) 对所有 $H\in HYP$,Σ 没有本原蕴涵式包含 $\neg A'\vee\neg A''\vee\neg H$.

那么$(A'\wedge A'',O)$是对假设空间 HYP 的一个判定测试.

定义 5(相关测试)[5]. 测试(A,O)是对假设空间 HYP 的一个相关测试 iff 对所有 $H\in HYP$,$\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足且测试(A,O)的结果 α 或者支持 HYP 中的一个假设子集或者否定一个子集.

定理 3[5]. 假定 Σ 至少有一个形如 $\neg A\vee\neg H'\vee O$ 的本原蕴涵式,其中 H' 是某 $H_i\in HYP$ 的子合取式.进一步假设存在 $H_j\in HYP$ 且 Σ 没有形如 $\neg A'\vee H''\vee O$ 的本原蕴涵式,其中 A' 和 H''分别是 A 和 H_j 的子合取式.最后假定对所有 $H\in HYP$,Σ 没有本原蕴涵式包含 $\neg A\vee\neg H$.那么(A,O)是对假设空间 HYP 的一个相关测试.

2 对 McIlraith 和 Reiter 工作的补充与修正

我们由定理 2 可得推论 1.

推论 1. 假设 Σ 至少有两个形如 $\neg A\vee\neg H'\vee O$ 和 $\neg A\vee\neg H''\vee\neg O$ 的本原蕴涵式,其中

(1) H' 和 H''分别是某 $H_i,H_j\in HYP$ 的子合取式;

(2) 对所有 $H\in HYP$,Σ 没有本原蕴涵式包含 $\neg A\vee\neg H$.

那么(A,O)是对假设空间 HYP 的一个最小判别测试.

我们发现,定理 3 的限定条件过于严格,它使确定相关测试过程复杂化,为此我们在满足了相关测试定义要求的情况下放宽了限定条件并证明其仍然成立.

定理 3′(修正后的相关测试定理).

(1) 假定 Σ 至少有一个形如 $\neg A\vee\neg H'\vee O$ 的本原蕴涵式,其中 H' 是某 $H_i\in HYP$ 的一个子合取式;

(2) 对所有 $H\in HYP$,Σ 没有本原蕴涵式包含 $\neg A\vee\neg H$.

那么(A,O)是对诊断候选空间的一个相关测试.

证明:因为 $\neg A\vee\neg H'\vee O$ 是 Σ 的一个本原蕴涵式,我们有 $\Sigma\wedge A\models H'\supset O$,进而 $\Sigma\wedge A\models H_i\supset O$,因为 Σ 没有本原蕴涵式包含 $\neg A\vee\neg H_i$,那么 $\Sigma\wedge A\wedge H_i$ 可满足.因此,如果测试(A,O)的结果为 O,那么 O 支持 $H_i\in HYP$;如果测试结果为 $\neg O$(也就是说未观测到 O),那么 $\neg O$ 否定 $H_i\in HYP$.这是因为 $\Sigma\wedge A\models H_i\supset O$ 逻辑上相当于 $\Sigma\wedge A\models H_i\supset\neg(\neg O)$,因此,由定义 3 我们知道,$\neg O$ 否定 $H_i\in HYP$. □

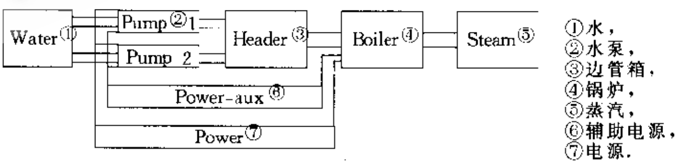

Fig. 1 Feedwater system
图1 供水系统

下面我们用简化后的核电站供水系统(如图 1 所示)诊断的例子来说明减少这一条件带来的好处.对于此系统,我们有以下公式集合:

$ab(Pump1)\wedge ab(Pump2)\supset Header\text{-}water\text{-}low$,

$ab(Power) \wedge ab(Power\text{-}aux) \supset Header\text{-}water\text{-}low$,
$ab(Water) \supset Header\text{-}water\text{-}low$,
$ab(Header) \supset Header\text{-}water\text{-}low$,
$Boiler\text{-}water\text{-}ok \supset \neg Header\text{-}water\text{-}low$,
$\neg Boiler\text{-}water\text{-}ok \supset \neg Steam$,
$ab(Boiler) \supset \neg Steam$.
系统元件 $COMPS=\{Water, Pump1, Pump2, Power, Power\text{-}aux, header, boiler\}$.

假如我们在供水系统正常工作条件下观测到 $OBS=\neg Steam$,利用这些模型进行推理,我们会得到如下最小候选诊断:

$HYP=\{H1=\{pump1, pump2\}, H2=\{power, power\text{-}aux\}, H3=\{water\}, H4=\{header\}, H5=\{boiler\}\}$.

为了确定测试(A,$Header\text{-}water\text{-}low$)是否为对 HYP 的相关测试(其中 A 为 $Header$ 正常工作条件),根据定理 3,我们必须找到一个 $H\in HYP$,使 $\Sigma\wedge A\not\models H\supset Header\text{-}water\text{-}low$.为此要调用推理程序来寻找那样的 H,这时就要依次对 $H1$,$H2$,$H3$,$H4$,$H5$ 进行检测,直到满足条件的 $H5$ 找到为止,否则(A,$Header\text{-}water\text{-}low$)就不是对 HYP 的相关测试.对这样一个简单的例子尚好处理,但如果诊断系统很大,就会有大量的候选诊断,诊断系统就要进行大量检测工作,问题求解要复杂得多,会使问题变成 NP 的.按照修正后的定理 3′,我们只要找到满足条件的本原蕴涵式即可,无需进行如此大量的检测工作,降低了问题计算复杂性,节省了大量计算时间.

3 对 McIlraith 和 Reiter 工作的扩充

McIlraith 的文章对基于一致候选诊断和对溯因候选诊断鉴别测试进行了形式化描述.他们对问题的描述进行了限制,只适用于初始测试条件为 $true$ 的情况,但这种情况存在一定的局限性:它只适用于对未知真值的测试点,而这些测试点可能存在不可测试或测试成本高等问题.那么,我们是否可以采取一些措施来避免这些问题呢?答案是肯定的.Shirley 和 Davis[6]曾经利用改变系统输入的办法进行诊断鉴别,Davis 和 Hamscher[7]也对改变系统输入测试给予了描述,Brusoni 和 Console 等人[8]提到了对随时间变化上下文数据(time-varying context)系统的多次测试来获得更多的鉴别信息,但是没有对此进行形式化描述.现在,我们利用图 2 中电路的候选诊断鉴别来说明这一问题.图 2 是我们熟悉的电路,由 3 个乘法器 $M1$,$M2$,$M3$ 和两个加法器 $A1$,$A2$ 相互连接构成,其输入输出如图所示.利用已建立的模型,我们从逻辑上推导出 4 个候选诊断:$H1=\{M1\}$,$H2=\{A1\}$,$H3=\{M2,M3\}$,$H4=\{M2,A2\}$.假设 $HYP=\{H1,H2,H3,H4\}$是对该电路的所有候选诊断,那么不进行测试就无法确定哪一个是对系统的真正诊断.在测试($true$,O)的情况下,测试参量 O 只能从 X,Y,Z 中选取,但若这几个测试点不能测试,或者能测试但成本很高,测试($true$,O)的应用就会受到限制.此时若改变系统的输入很方便,系统输出 $O1$,$O2$ 又易于观测,那么我们就可以避开对 X,Y,Z 的测试.例如,令 A 为改变输入 $I4$ 为 2,其余输入不变,O 为观测参量 $O1$,$O2$ 的值,此时测试(A,O)就变得有意义了:若观测到 $O1=8$,$O2=12$,则说明 $M2$,$A2$ 异常,$H4$ 是对系统的诊断(因为改变 $M2$ 的输入 $I4$,$A1$ 的输出 $O1$ 有变化,表明 $M2$ 的输出发生了变化,但与这一输出相连的元件 $A2$ 的输出 $O2$ 却没有变化,说明 $A2$ 发生了故障,加上 HYP 是该电路所有候选诊断,推知 $M2$ 也是故障元件);同样道理,若观测到 $O1=10$,$O2=10$,说明 $A1$ 异常,$H2$ 是对系统的诊断.此例说明,通过扩充测试条件,不但对未知真值的测试点的测试能够获得新信息,而且对已知真值的测试点的重新测试也同样能获得新信息实现候选诊断的鉴别.这样,当我们对候选诊断进行鉴别时,就可以根据测试成本和测试效率等相关因素来选择是对未知真值测试点的测试($true$,O),还是对所有可测试点的测试(A,O),从而为降低测试成本,实现候选诊断的鉴别提供更多的选择余地.

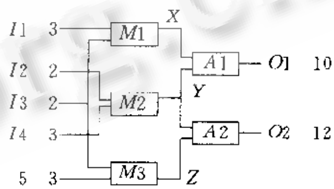

Fig. 2 A familiar circuit
图2 一个熟悉的电路

鉴别诊断原理(DDP). 给定 HYP,Σ,α,(A,O)如上,鉴别诊断原理是:对 $\Sigma\wedge A\wedge\alpha$ 的假设集合$\{H\in HYP\mid\alpha$ 不删除 $H\}$是 HYP 的一个子集合.

注意,新背景理论是 $\Sigma\wedge A\wedge\alpha$,反映了从实现该测试生成的新背景知识,这里的 A 是任意的,与我们要描述的有所不同.鉴别诊断原理只对完备假设空间适用,下面我们就对扩充后的鉴别测试进行刻画.

定理 4(基于一致 DD). 假设 HYP 是对 Σ 的所有基于一致诊断集合,且 α 是测试(A,O)的结果,其中 A 是不影响系统元件状态的任何可满足测试条件,那么 $NEWHYP=\{H\in HYP|\alpha$ 不否定 $H\}$是对 $\Sigma\wedge A\wedge\alpha$ 的基于一致候选诊断集合.

证明:对任意的 $H\in HYP$,由于 A 不影响元件状态,也就是说,$\Sigma\wedge A\not\models\neg H$,因此 $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足,以致于 H 是对 $\Sigma\wedge A$ 的基于一致候选诊断,由 H 的任意性,HYP 是对 $\Sigma\wedge A$ 的所有基于一致候选诊断的集合.

令 $H\in conj(H)^*$,我们必须证明 $H\in NEWHYP$ iff $\Sigma\wedge A\wedge\alpha\wedge H$ 可满足.

($\Rightarrow$) $H\in NEWHYP$,α 不否定 H,也就是说,$\Sigma\wedge A\not\models H\supset\neg\alpha$,因此,$\Sigma\wedge A\wedge\alpha\wedge H$ 可满足,H 是对 $\Sigma\wedge A\wedge\alpha$ 的基于一致候选诊断.

($\Leftarrow$) $\Sigma\wedge A\wedge\alpha\wedge H$ 可满足,那么 $\Sigma\wedge A\not\models\supset\neg\alpha$,也就是说 α 不否定 H,而且 $\Sigma\wedge H$ 可满足,以至于 $H\in HYP$,因此,$H\in NEWHYP$. □

定理 5(溯因 DD). 假设 HYP 是对 Σ 的所有溯因候选诊断,且 α 是测试(A,O)的结果,其中 A 是不影响元件状态的任意测试条件,那么 $NEWHYP=\{H\in HYP|\alpha$ 支持 $H\}$是对 $\Sigma\wedge A\wedge\alpha$ 的溯因候选诊断集合.

证明:对任意的 $H\in HYP$,由于 A 不影响元件状态,也就是说,$\Sigma\wedge A\not\models\neg H$,因此 $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足.令 $H\in conj(H)$,我们必须证明 $H\in NEWHYP$ iff $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足且 $\Sigma\wedge A\wedge H\models\alpha$.

($\Rightarrow$) $H\in NEWHYP$,那么 α 支持 H,也就是说,$\Sigma\wedge A\models H\supset\alpha$,即 $\Sigma\wedge A\wedge H\models\alpha$.再加上 $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足,以至于 H 是对 $\Sigma\wedge A\wedge\alpha$ 的溯因候选诊断.

($\Leftarrow$) $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足且 $\Sigma\wedge A\wedge H\models\alpha$,那么 $\Sigma\wedge A\models H\supset\alpha$,也就是说,$\alpha$ 支持 H.而且 $\Sigma\wedge A\wedge H$ 可满足,以至于 $H\in HYP$,因此,$H\in NEWHYP$. □

定义 6(简单因果理论). 令 L 是一个命题语言,一个简单因果理论是一个三元组(C,E,Σ),其中:

(1) C,原子句子集合,是一个原因集合;

(2) E,原子句子集合,是一个结果集合;

(3) Σ,L 的句子集合,是领域理论,包含原因和结果间的关系信息.Σ 的句子形如 $C'\supset e$ 且 C' 的命题符号是原因的文字合取.

定义 7(封闭简单因果理论). 令(C,E,Σ)是一个简单因果理论,Σ 为非原子的确定句子集合,其有向图为非循环的,那么我们定义 Σ^* 是封闭简单因果理论 Σ 的 Clark 完备化扩充.

定理 6(基于一致的 Σ^* 的 DD). 假设(C,E,Σ)是一简单因果理论,HYP 是对 Σ^* 的基于一致候选诊断集合,并且 α 是测试(A,O)的结果,其中 A 是不影响元件状态的任意可满足测试条件,$O\in E$.那么 $NEWHYP=\{H\in HYP|\alpha$ 支持 $H\}$是对 $\Sigma^*\wedge A\wedge\alpha$ 的基于一致候选诊断集合.

证明:令 $H\in conj(H)$,我们必须证明 $H\in NEWHYP$ iff $\Sigma^*\wedge A\wedge\alpha\wedge H$ 可满足.

($\Rightarrow$) $H\in NEWHYP$,那么 α 支持 H,因此 α 不否定 H,有定理 4 我们知道 H 是对 $\Sigma^*\wedge A\wedge\alpha$ 的基于一致候选诊断.

($\Leftarrow$) $\Sigma^*\wedge A\wedge\alpha\wedge H$ 可满足,那么由定理 4 知,$H\in NEWHYP'$,$NEWHYP'$ 是对 $\Sigma^*\wedge A\wedge\alpha$ 的基于一致候选诊断集合,因此 $H\in HYP$.由 Σ^* 是对 Σ 的 Clark 完备化,我们能推出 $\Sigma^*\models\alpha\equiv B$,其中 B 为一条语句,其所有命题原子在 H 中,因为 $H\in conj(H)$,B 中出现的每一原子也出现在 H 中,以至于$\models H\supset B$ 或$\models H\supset\neg B$,因此 $\Sigma^*\models H\supset\alpha$ 或 $\Sigma^*\models H\supset\neg\alpha$.由于 $\Sigma^*\wedge A\wedge\alpha\wedge H$ 可满足,从而可推出 $\Sigma^*\wedge A\models H\supset\alpha$ 或 $\Sigma^*\wedge A\models H\supset\neg\alpha$.由于 $\Sigma^*\wedge A\wedge\alpha\wedge H$ 可满足,因此 $\Sigma^*\wedge A\not\models H\supset\neg\alpha$,以至于只能 $\Sigma^*\wedge A\models H\supset\alpha$ 成立,也就是说,α 支持 H,再加

* $H=\{h1,\ldots,hn\}$是作为基本假设的可区分有限命题符号子集合.$conj(H)$是形如 $l1\wedge\ldots\wedge ln$ 的所有合取集合,其中 li 是一文字,hi 是 li 所涉及到的命题符号,详细情况可参见文献[5].

上 $H \in HYP$ 可得 $NEWHYP' = NEWHYP$,这样就证明了 $H \in NEWHYP$. □

扩充后的定理 4～6 提高了鉴别诊断测试的适应性,使鉴别测试不局限于对系统的简单探测,也可通过采用改变系统的上下文相关数据(context)等措施,利用其对以前观测值的影响结果来鉴别候选诊断,因此文献[5]的鉴别诊断定理是我们的特例.这几个定理的结果可用于测试选择策略.例如,为了从基于一致候选诊断空间中分离出一个独立候选,鉴别诊断必须选择某个测试序列来否定除一个以外的所有其余候选诊断;相比之下,一个独立溯因候选诊断或可通过选择测试序列来否定所有其余的候选,或可只选择支持那个候选的一个或多个测试,此时,测试的选择非常有意义.

4 结 论

本文对 McIlraith 和 Reiter 的相关测试理论存在的问题进行了修正,简化了相关测试条件,从而可降低问题的复杂性,提高测试效率.针对该文鉴别诊断原理的刻画,我们把初始测试条件从 *true* 推广到不影响元件状态的任何可满足测试条件 A,并从理论上给予证明.测试条件的放宽相应地提高了鉴别测试的适应能力,为降低测试成本、提高测试效率提供了更多的选择空间.

如上面所注意到的,我们对鉴别诊断原理进行扩充是以不影响系统中元件状态为前提的,对于影响元件状态的测试条件,必须利用信念更新和修正等行动理论相结合的办法进行描述,这是我们目前正在进行的工作.

参考文献

1 Li Zhan-shan, Jiang Yun-fei. A retrospect and prospect on model-based diagnostic reasoning. Computer Science, 1998,25(6):54～57
(李占山,姜云飞.基于模型诊断推理的回顾与展望.计算机科学,1998,25(6):54～57)
2 Hamscher W, Console L, de Kleer J. Readings in Model-Based Diagnosis. San Mateo, CA: Morgan-Kaufmann Publishers, Inc., 1992
3 Reiter R. A theory of diagnosis from first principles. Artificial Intelligence, 1987,32(1):57～95
4 de Kleer J, Williams B C. Diagnosing multiple faults. Artificial Intelligence, 1987,32(1):97～130
5 McIlraith S, Reiter R. On tests for hypothetical reasoning. In: Hamscher W, Console L, de Kleer J eds. Readings in Model-Based Diagnosis. San Mateo, CA: Morgan-Kaufmann Publishers, Inc., 1992. 89～96
6 Shirley M, Davis R. Generating distinguishing tests based on hierarchical models and symptom information. In: Hamscher W, Console L, de Kleer J eds. Readings in Model-Based Diagnosis. San Mateo, CA: Morgan-Kaufmann Publishers, Inc., 1992. 341～347
7 Davis R, Hamscher W. Model-Based reasoning: troubleshooting. In: Shrobe H E ed. Exploring Artificial Intelligence: Survey Talks from the National Conferences on Artificial Intelligence. San Mateo, CA: Morgan-Kaufmann Publishers, Inc., 1988. 297～346
8 Brusoni V, Console L, Terenziani P *et al*. A spectrum of definitions for temporal model-based diagnosis. Artificial Intelligence, 1998,102(1):39～79

A Correction and Extension to the Testing Theory for Model-Based Diagnosis

LI Zhan-shan[1] JIANG Yun-fei[2]

[1](*Department of Computer Science Jilin University Changchun* 130023)

[2](*Computer Software Institute Zhongshan University Guangzhou* 510275)

Abstract Although McIlraith and Reiter characterized the test for model-based diagnosis, the limiting conditions of their researches are too strict. In this paper, the limiting conditions of relevant test theorem are relaxed and the revised releva nt test theorem and its proof are presented. As the extension of McIlraith's theories, the initial test condition of the Differential Diagnosis Principles is generalized, which improves the adaptability of differential diagnosis test.

Key words Candidate diagnosis, discriminating test, relevant test, differential test, test condition.