基于布尔方程的系统级故障诊断表示及应用*)

刘 兵[1] 张大方[1] 宣恒农[2]

(湖南大学计算机与通信学院 长沙410082)[1] (五邑大学计算机工程系 广东江门529020)[2]

Representation and Application of the System-level Fault Diagnosis Based on Boolean Equation

LIU Bing[1] ZHANG Da-Fang[1] XUAN Heng-Nong[2]

(College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082)[1]

(Department of Computer Engineering, Wuyi University, Guangdong Jiangmen 529020)[2]

Abstract With the popularization of multiprocessor systems and network applications, the study of dependability of systems has become an important research area of computer science. A "Boolean equation diagnosis" method is firstly presented for test model of system-level fault diagnosis, and the correctness of the equations has been proven. The Boolean equation is more concise than the graph method in test model representation. Based on the equations, the methods to compute optimal diagnosis, the set of consistent fault pattern, absolute good processors and bad processors are presented. And some theorems about the relationship among different test models on the set of consistent fault pattern and diagnosibility are proved. It is a useful attempt in theory and practice of system-level fault diagnosis.

Keywords System-level fault diagnosis, Test model, Boolean equation; Consistent fault pattern

1 引言

随着多处理机和网络系统的日益普及,人们迫切需要能够快速准确地对系统级故障模型进行诊断,即进行系统级故障诊断;其研究已成为计算机技术的一个重要领域,所谓系统级故障诊断,它的基本思想是:首先让系统中各处理机相互测试,然后通过对所有测试结果进行逻辑分析,从而找出故障处理机。为了有效地研究诊断,必须依据实际情况对测试结果进行假设,不同的假设产生了不同的测试模型。自从1967年Preparata 等人首次提出系统级故障诊断的图论模型——PMC 模型[1]以来,在随后的三十多年时间里,人们又提出了Chwa&Hakimi 模型等一个个理论上更完备、更适用于实际系统的测试模型[2,3],并研究出若干富有成效的诊断算法。

系统级故障诊断最早是用于多处理器的诊断,但由于其测试模型的广泛适用性,随着20世纪90年代开始网络技术的突飞猛进,基于网络的系统级故障诊断日益突显重要起来:1992年出现了第一个应用于实际网络的系统级故障诊断[4],在随后的几年中,出现了基于 SNMP 的系统级故障诊断[5],近两年来,由于新的网络技术不断涌现,对虚拟专用网的系统级故障诊断[6]和对无线 ad-hoc 网络的系统级故障诊断[7]成为热点。随着下一代网络—网格技术的提出与研究,基于网格的系统级故障诊断的研究将成为新的焦点。

通过我们对前人工作的研究及对图论模型的深入分析,首次在本文中提出了基于布尔方程诊断的概念,并在此基础上推出若干有价值的性质与定理,可较好地用于指导基于网络的系统级故障诊断,如对提高虚拟专用网的诊断效率和无线移动网络的诊断稳定性均可起到一定的作用。

2 系统级故障诊断中布尔方程概念的提出

在系统级故障诊断中,测试是诊断的基础。为了有效地进行诊断,必须假设测试结果能够为诊断提供足够的信息,这些假设被称为测试模型。对于最早提出的 PMC 模型可表示为表1,其中测试结果为0表示测试机认为被测机为好机,为1表示测试机认为被测机为坏机。

表1 PMC 模型

测试机	被测机	测试结果
无故障	无故障	0
无故障	有故障	1
有故障	无故障	0/1
有故障	有故障	0/1

若用符号和数字来表示,则其相互关系可表述得更加简洁(表2)。

表2 PMC 模型

x_i	x_j	a_{ij}
0	0	0
0	1	1
1	0	0/1
1	1	0/1

由上表可以看出,处理机与测试结果均只能出现0,1两种状态,与布尔值的两种状态相拟合。因此,对于上述模型,为了简化推理,明晰思路,易于诊断,我们可推出 PMC 模型中测试结果与处理机之间一定满足如下布尔方程关系:(其中 x_i+x_j 指或运算,x_ix_j 指与运算)

*)本文受到国家自然科学基金资助项目(编号:69973016)和广东省自然科学基金资助项目(编号:010475)共同资助。刘 兵 硕士研究生,研究方向为可信系统与网络。张大方 教授,博士生导师,主要从事可信系统与网络等方面研究。宣恒农 教授,硕士生导师,主要从事故障诊断等方面的研究。

$$\prod_{p=1}^{l}(x_i+x_j)\prod_{q=1}^{k}\overline{\overline{x_j}\,\overline{x_i}}=1 \quad (1)$$

(p 为 $a_{ij}=1$项,q 为 $a_{ij}=0$项)

分析:由表2可推知,当测试结果 $a_{ij}=0$时,处理机 x_i 与 x_j 之间满足$\overline{x_i}x_j=a_{ij}$关系;当 $a_{ij}=1$时,x_i 与 x_j 之间满足 $x_i+x_j=a_{ij}$关系。另将表1(表2)中测试机,被测机及测试结果每一可能出现的组合代入方程均可见其成立。则整个测试可归结为方程(1)。我们称方程(1)为 PMC 模型的布尔方程。

3 相关性质与定理

在系统级故障诊断领域中,共有四种著名的测试模型,除上述提到的 PMC 模型外,还包括 BGM 模型,Chwa&Hakimi 模型,以及 Maleks 模型(如表3所示)。系统级故障诊断中其他各类模型均为此四类模型的延伸。

表3 BGM,Chwa&Hakimi,Maleks 模型

x_i	x_j	a_{ij}[BGM]	a_{ij}[Chwa&Hakimi]	a_{ij}[Maleks]
0	0	0	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0/1	1	1
1	1	1	0/1	1

性质1 对表3中三种模型,其布尔方程可类似表示为:

a)BGM 模型:

当 $a_{ij}=0$时,$x_j=a_{ij}$;当 $a_{ij}=1$时,$x_i+x_j=a_{ij}$

即有$\prod_{p=1}^{l}(x_i+x_j)\prod_{q=1}^{k}\overline{x_j}=1$(p 为 $a_{ij}=1$项,q 为 $a_{ij}=0$项)

b)Chwa&Hakimi 模型:

当 $a_{ij}=0$时,$x_i\oplus x_j=a_{ij}$;($\oplus$指异或运算)

当 $a_{ij}=1$时,$x_i+x_j=a_{ij}$;

即有$\prod_{p=1}^{l}(x_i+x_j)\prod_{q=1}^{k}\overline{x_i\oplus x_j}=1$(p 为 $a_{ij}=1$项,q 为 $a_{ij}=0$项)

c) Maleks 模型:

无论 a_{ij}为0或1,均有 $x_i+x_j=a_{ij}$

即有$\prod_{p=1}^{l}(x_i+x_j)\prod_{q=1}^{k}\overline{x_i+x_j}=1$(p 为 $a_{ij}=1$项,q 为 $a_{ij}=0$项)

类似于 PMC 模型,从与其对应的表3中可很容易得出上述布尔方程的正确性。从上述布尔方程可看出,其表达形式简洁,清晰。

为论述方便,我们提出如下定义:

定义1 对上述四种测试模型的布尔方程,将其左端展开为与或形式,并加以适当化简,均可得如下形式:

$$x_{i1}x_{i2}\cdots+x_{p1}\overline{x_{p2}}\cdots+\cdots+x_{m1}x_{m2}=1 \quad (2)$$

我们称上式为各个测试模型所对应的标准式,其中每一项(如 $x_{i1}x_{i2}\cdots$)称为与项。每一与项中形如 x_{p1}称为正项,$\overline{x_{p2}}$称为非项。

式(2)的表示形式,通用于上述四种测试模型,以下若未加说明,则相关性质均可用于任何一种模型。

定义2[1] 给定一权为 w 的图 $G_w(U,T)$后,故障模式 F($\subset$U)称为相容故障模式当且仅当 F 的故障相应与权 w 是一致的。

性质2 在式(2)中,若每一与项中均包含同一项x_i,则 x_i 一定为坏处理机,称其为绝对坏机。若每一与项中均包含同一项$\overline{x_j}$,则 x_j 一定为好处理机,称其为绝对好机。对其余处理机,其状态可能为好,也可能为坏,则取决于其所属的某个具体的相容故障模式。

证明:当式(2)中,每一与项中均包含同一项 x_i 时,由布尔方程的解性质可知,若使等式成立,x_i 一定取1,即 x_i 一定为坏处理机。若每一与项中均包含同一项$\overline{x_j}$,则可知 x_j 一定取0,即 x_j 一定为好处理机。对于其他处理机,则无法从式(2)中绝对确定其状态。

由性质1中各个测试模型具体表示及性质2可推知:对于给定的症候(症候是指一组具体给定的测试结果的集合),相对于 PMC 模型来说,能判断出是否存在绝对坏机,但无法判断某机为绝对好机。但相对于 BGM 模型与 Maleks 模型,则能够判断出是否存在绝对好机。如对 BGM 模型,可能存在 $x_j=0$一项(见性质1.a),则可知 x_j 一定为好处理机。

定义3[1] 对于一给定的症候,求与此症候相容的最小故障集所对应的相容故障模式称为最优诊断。

性质3 对式(2),假设其所含与项个数为 r 个,对每一与项,分别计算其所含正项个数,设所含正项个数最少的为第 k 项($1\leqslant k\leqslant r$),则置第 k 项中的每个正项为1,对系统中剩余所有处理机 x_i 置0,则即求得系统的最优诊断。

证明:对上述性质,因其至少有一与项为1,诊断结果则满足式(2),因此其必为一相容故障模式,又可知,在所有相容故障模式中,按上述求法,此为含故障数最少的诊断结果。因此其为系统的最优诊断。

定义4[1] 对于包含 n 个单元的系统 G(U,T),假定任何故障集 F 的数目$|F|\leqslant t$(t 为正整数),且对任何症候最多只存在一个故障模式 F 与之相容,则称此系统为(一步)t 可诊断的。

对于 t 可诊断系统,其诊断结果实质是在 t 可诊断条件下求系统的最优诊断。因此由性质3所求得的最优诊断即为 t 可诊断系统的诊断结果。

性质4 对式(2),假设所含与项个数为 r 个,则对一给定 q($1\leqslant q\leqslant r$),取出其中的任意 q 个与项,对此 q 个与项中每一与项中每个正项置为1,每个非项置为0,如果无某个 x_i 冲突(即可能在 q 个与项中,在某项中以 x_i 形式出现,在某项中又以$\overline{x_i}$形式出现),则置剩余所有处理机 x_j 为0,可得一相容故障模式。当取遍所有组合后,即可求出系统的全体相容故障模式。

性质4的正确性证明类似于性质3。对上述算法,在最坏情况下,共有 $C_r^1+C_r^2+\cdots+C_r^r=2^r-1$个相容故障模式,但有些情况可能对某些 x_i 取值有冲突,因此实际的相容故障模式比 2^r-1要少一些。

通过上述算法,假设所求出的对 PMC 模型其全体相容故障模式所组成的集合为 A,对 BGM 模型其全体相容故障模式所组成的集合为 B,对 Chwa&Hakimi 模型其所组成的集合为 C,对 Maleks 模型其所组成的集合为 D,则有如下定理:

定理1 对于一给定的相同症候,假设由上述四种诊断模型求出的全体相容故障模式组成的集合各为 A,B,C,D,则有如下关系:$D\subset C\subset A\quad D\subset B\subset A$。

证明:我们以 $D\subset C$ 为例进行证明。设对 Maleks 模型中任一相容故障模式(假设为 p),若其中 x_i 与 x_j 之间存在测试边,则必有 $x_i+x_j=a_{ij}$。若 $a_{ij}=1$,则 $x_i+x_j=1$,即同样满足 Chwa&Hakimi 模型中的 $x_i+x_j=a_{ij}(a_{ij}=1)$条件。若 $a_{ij}=0$,则可知 $x_i+x_j=0$,其解为(0,0),满足 $x_i\oplus x_j=0$,即同样满足 Chwa&Hakimi 模型在 $a_{ij}=0$条件下的解。则有 $p\in C$。由此可

知，对 D 中的任一相容故障模式，均也为 C 中所包含的相容故障模式，即有 $D\subset C$。同样我们可证得 $C\subset A$。因此有 $D\subset C\subset A$。同理可证得 $D\subset B\subset A$。

定理2 B，C，D 含义同上述定理1，则 B，C，D 间满足如下关系：$D=B\cap C$。

证明：当 $a_{ij}=0$ 时，对 BGM 模型，有 $x_j=0$；对 Chwa&Hakimi 模型，有 $x_i\oplus x_j=0$，则对 $B\cap C$，有 $x_i=x_j=0$，可知其满足 $x_i+x_j=a_{ij}(a_{ij}=0)$。当 $a_{ij}=1$ 时，对 BGM 模型与 Chwa&Hakimi 模型均为 $x_i+x_j=1$，则 $B\cap C$ 为 $x_i+x_j=a_{ij}(a_{ij}=1)$。因此可知，对 $B\cap C$，无论 a_{ij} 取何值时，对 $B\cap C$ 中某一相容故障模式的 x_i 与 x_j 之间，均应满足 $x_i+x_j=a_{ij}$。而对于 Maleks 模型，D 即为满足 $x_i+x_j=a_{ij}$ 的所有相容故障模式的集合。因此有 $D=B\cap C$。

通过定理1与定理2，可以很好地研究四种模型之间相容故障集之间的关系。

定理3 在不存在绝对坏机的情况下，PMC 模型与 Chwa&Hakimi 模型有相同的最优诊断。

证明：由 $C\subset A$ 可知，若某一相容故障模式（假设为 p）为 Chwa&Hakimi 模型的最优诊断，则 p 至少一定也为 PMC 模型的相容故障模式。由文[8]中可推知，两故障模型所对应症候分别进行集团运算后，所形成的集团诊断图相同，且均可转化为只含 $u_i+u_j=1$ 项（此时 u_i 与 u_j 均为集团点）。因为不存在绝对坏机的情况，则无集团可确切确定状态。因此由性质3可求出其相同的最优诊断，即 PMC 模型与 Chwa&Hakimi 模型有相同的最优诊断。

定理4 设对某一给定的测试图，假设相对于 PMC 模型其可诊断度为 Ta，相对于 BGM 模型其可诊断度为 Tb，相对于 Chwa&Hakimi 模型其可诊断度为 Tc，相对于 Maleks 模型其可诊断度为 Td，则有：$Td\geqslant Tc\geqslant Ta$；$Td\geqslant Tb\geqslant Ta$。

证明：假设此测试图对于 PMC 为 Ta 是可诊断的，在此 Ta 可诊断条件下的解假设为 p，则有 $p\in A$，且 p 为 A 中含故障点个数最少的相容故障模式。由定理2可知 $C\subset A$。则对 C 中任一相容故障模式中所含故障点数绝对不会小于 p 中所含故障点数。可知此测试图对 Chwa&Hakimi 模型来说，其最优诊断中故障点个数一定不会小于 p 中所含故障点个数。因此有 $Tc\geqslant Ta$。同样我们可证得 $Td\geqslant Tc$，即有 $Td\geqslant Tc\geqslant Ta$，同理可证得 $Td\geqslant Tb\geqslant Ta$。

定理4说明：1）对一给定的测试图，若其相对于 PMC 模型为 t 是可诊断的，则其对 Chwa&Hakimi 模型一定至少也为 t 可诊断的，反之则不然。2）为达到相同的 t 可诊断性，PMC 模型所需的测试数不会少于 Chwa&Hakimi 模型所需的测试数。满足定理4的其他模型之间也有类似关系。

结论 上述性质和定理在对实际应用的网络诊断中有着很好的指导作用。如对虚拟专用网，由于其网点的规模性及分散性，每次诊断将占用大量资源，而当测试模型改变后，由上面的定理可推出一些相容故障模式而不需进行重新的诊断计算；并且在上述定理的指导下，选取适当的测试模型，可有效降低测试边的数目（即降低物理链路的数目），节约企业组网成本，提高诊断效率。又如在无线 ad-hoc 网络中，由于网路拓扑结构的不断变化性，很难再用图论中某些性质，对诊断带来一定难度，而对于布尔方程，则很容易加入或去除某项，而不需变换上述诊断算法，以高效、实时完成诊断。

本文首次提出了基于布尔方程的系统级故障诊断的概念，并在此基础上推出若干性质与定理，可用于理论上的研究，并对现代不同网络的诊断技术起到一定的指导作用。对于相关性质和对每个模型特殊性质的研究，以及如何将其更有效地运用于网络技术仍在进行之中。

参考文献

1 Preparata F P, Metze G, chien R T. On the connection assignment problem of diagnosable systems. IEEE Trans. Electronic Computers, 1967, 12: 848～854

2 Chwa K Y, Hakimi S L. Scheme for fault-tolerant computing: a comparison of modularly redundant and t-diagnosable system. Information Control, 1981, 49: 212～238

3 Malek M. Undirected graphs models for sytem-level fault diagnosis. In: proc. 7th symp. Comput. Architecture, 1980. 31～35

4 Bianchini R, Buskens R. Implementation of On-Line Distributed System-Level Diagnosis Theory. IEEE Trans. Computers, 1992, 41(5): 616～626

5 Duarte E Jr, Nanya T. A hierarchical adaptive distributed system-level diagnosis algorithm. IEEE Trans. Computers, 1998, 47(1)

6 Jeon G, Cho Y. A system-Level Diagnosis for Internet-based Virtual Private Networks. In: FTCS-29. June 1999

7 Chessa S, Santi P. Comparison-Based System-level Fault Diagnosis in Ad-Hoc Networks. In: Proc. IEEE SRDS 2001

8 Zhang Dafang, Xie Gaogang, Min yinghua. Node grouping in system-level fault diagnosis. J. Comput. Sci. & Technol, 2001, 16(5): 474～479

（上接第132页）

28 Mobasher B, Cooley R, Srivastava J. Automatic personalization based on Web usage mining. In Communications of the ACM, 2000, 43(8)

29 Mobasher B, Cooley R, Srivastava J. Creating adaptive web sites through usage-based clustering of URLs. In: IEEE Knowledge and Data Engineering Workshop (KDEX'99), 1999

30 Luotonen A. The Common Logfile Format. http://www.w3.org/daemon/user/config/logging.html, 199

31 Silberschatz, Tuzhilin A. On subjective measures of interestingness in knowledge discovery. In: U. Fayyad and R. Uthurusamy, eds. Proc. of KDD-95: First International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Menlo Park, CA, AAAI Press, 1995. 275～281

32 Klemettinen M, Mannila H, Ronkainen P, Toivonen H, Verkamo A I. Finding Interesting rules from Large Sets of discovered association rules. In: Proc. of the Third Intl. Conf. on Information and Knowledge Management, 1994. 401～417

33 Padmanabhan, Tuzhilin A. Unexpectedness as a Measure of Interestingness in Knowledge Discovery. Decision Support Systems, 1999, 27: 308～318

34 Padmanabhan B, Tuzhilin A. On Characterization and Discovery of Minimal Unexpected Patterns In Data Mining Applications. citeseer.nj.nec.com/padmanabhan01characterization.html

35 Liu Bing, Hsu W, Chen Shu, Ma Yiming. Analyzing the Subjective Interestingness of Association Rules. In IEEE Intellgent Systems, 2000, 15(5): 47～55