

系统级故障诊断中可诊断性的研究与发展*

郭晨^{1,2,3}, 张丽^{1†}, 冷明^{1,4}

(1. 井冈山大学 电子与信息工程学院, 江西 吉安 343009; 2. 流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江西 吉安 343009; 3. 广西大学 电气工程学院, 南宁 530004; 4. 清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要: 为了理清系统级故障诊断中各个可诊断性之间的关联关系、优缺点以及适用性,在充分分析系统级故障诊断中可诊断性的国内外研究现状的基础上,针对各个可诊断性的继承性关联关系、诊断能力、故障的限制性条件进行了研究,进而指出了可诊断性未来的发展方向和各种诊断方法的工程应用潜力与前景。

关键词: 多处理器计算机系统; 系统级故障诊断; 可诊断性; 诊断度

中图分类号: TP306.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)02-0327-06

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.02.002

Study and development of diagnosable in system level diagnosis

Guo Chen^{1,2,3}, Zhang Li^{1†}, Leng Ming^{1,4}

(1. School of Electronic & Information Engineering, Jinggangshan University, Ji'an Jiangxi 343009, China; 2. Key Laboratory of Watershed Ecology & Geographical Environment Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping & Geoinformation, Ji'an Jiangxi 343009, China; 3. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Dept. of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to find out the relationship, the advantages and disadvantages, and the scope of each diagnosable system, this paper determined the relationship among diagnoses, diagnosability and the restrictive conditions. Then it put forward the future development directions and engineering application potential and prospect of diagnostic method in system level diagnosis.

Key words: multi-processor computer system; system level diagnosis; diagnosable; diagnosability

0 引言

多处理器计算机系统的故障诊断问题由来已久,其诊断方式按照故障的不同分为门级、芯片级、子系统级和系统级^[1]。其中门级和芯片级故障诊断针对的是门电路和芯片,子系统级针对的是功能模块,而只有系统级故障诊断是采取自我诊断方式来识别处理器以及通信链路的故障。系统级故障诊断充分利用了多处理器计算机系统中每一个处理器的测试能力,让处理器之间进行相互测试,通过诊断算法对测试结果进行综合分析来识别出故障节点的所在。通常情况下,系统级故障诊断可以带电进行,因此系统级故障诊断是故障诊断的主要研究方向之一。

经历了半个世纪的研究与发展,迄今为止,系统级故障诊断中的可诊断性研究已经提出了多种可诊断性理论,具体包括 t -可诊断^[2]、 t/s -可诊断^[3]、 t_1/t_1 -可诊断^[4]、 t/k -可诊断^[5]、 t_i -可诊断^[6]、 t_h/t_{hi} -可诊断^[7]、条件 t -可诊断^[8]和 g 正确邻节点条件 t -可诊断^[9]。根据诊断特征的不同把这些可诊断性分为四种类型,分别为精确可诊断、非精确可诊断、间歇性可诊断和条件可诊断,如表1所示。

表1 系统级故障诊断中可诊断性分类

可诊断性类别	可诊断性
精确可诊断	t -可诊断 t/s -可诊断
非精确可诊断	t_1/t_1 -可诊断 t/k -可诊断
间歇性可诊断	t_i -可诊断 t_h/t_{hi} -可诊断
条件可诊断	条件 t -可诊断 g 正确邻节点条件 t -可诊断

其中,精确可诊断中的 t -可诊断对于故障节点没有任何限制,也就是说, t -可诊断中的故障可以在任意位置以任意规模存在。非精确可诊断包括 t/s -可诊断、 t_1/t_1 -可诊断和 t/k -可诊断三种类型。非精确可诊断允许误诊断的存在,也就表示最终识别出来的故障节点集合中可能存在着被误诊断的节点。间歇性可诊断包括 t_i -可诊断和 t_h/t_{hi} -可诊断两种类型。间歇性可诊断面对的是间歇性故障,这种故障有时表现出故障节点的特征,有时又表现出正常节点的特征。条件可诊断包括条件 t -可诊断和 g 正确邻节点条件 t -可诊断两种类型。条件可诊断是给故障节点集合加上一个条件来限制一些低概率情况的发生,其中条件 t -可诊断要求系统中的每一个节点至少要有有一个正确的邻节点,而 g 正确邻节点条件 t -可诊断则进一步要求系

收稿日期: 2017-02-19; 修回日期: 2017-03-27 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61562046); 国家科技支撑计划资助项目(2012BAC11B03); 江西省教育厅科技项目(GJJ150777, GJJ160742)

作者简介: 郭晨(1979-),男,江西泰和人,副教授,博士,主要研究方向为网络分析、故障诊断; 张丽(1985-),女(通信作者),实验师,硕士,主要研究方向为计算机网络、智能算法(bearr@21cn.com); 冷明(1975-),男,教授,博士,主要研究方向为智能算法、容错计算。

统中的每一个正确的节点至少有 g 个正确的邻节点。系统级故障诊断中的可诊断性研究已经发展成一个具有多种不同针对性的可诊断性理论集合,各种可诊断性又都具有各自不同的适用性和使用范围,发展的过程表现出诊断能力和诊断效果的不断进步。

本文首先研究和分析了可诊断性国内外研究现状,在此基础上详细阐明了各种可诊断性的继承关系、优缺点和使用范围,进而指出了未来可诊断性的发展方向。

1 系统级故障诊断的可诊断性研究

1.1 t -可诊断

早在 1967 年,Preparata 等人^[2]就系统地提出了 t -可诊断理论。 t -可诊断指的是在一个有着 n 个节点的系统中,只要故障节点不超过 t 个,那么系统中的所有故障节点都可以被诊断出来。 t -可诊断系统指的是满足 t -可诊断的计算机系统。 t -可诊断又可以进一步分为一步 t -可诊断和顺序 t -可诊断两种类型。

一步 t -可诊断指的是当系统的故障节点数小于或者等于 t 时,系统可以一步找出所有的故障节点。一步 t -可诊断具有以下性质定理:

引理 1^[2] 对于具有 n 个节点的系统,如果系统是一步 t -可诊断系统,那么 $n \geq 2t + 1$ 。

引理 2^[10] 在不允许节点互测的条件下,系统是一步 t -可诊断系统当且仅当每一个节点至少会被其他 t 个节点测试。

定理 1^[10] 系统 G 是一步 t -可诊断系统,当且仅当 $n \geq 2t + 1$,并且 $k(G) \geq t$,其中 $k(G)$ 表示系统 G 的点连通度。

定理 1 给出了点连通度与一步 t -可诊断之间的关联关系。当系统的总节点数 n 比故障节点数 t 的两倍还多,同时系统的点连通度也不小于 t 时,系统是一步 t -可诊断系统。

定理 2^[10] 一个有 n 个节点的系统是一步 t -可诊断系统,当且仅当满足以下三个条件:

a) $n \geq 2t + 1$;

b) 对于系统的任意节点 v 都有 $d_{in}(v) \geq t$,其中 $d_{in}(v)$ 表示 v 的入度;

c) 对于每一个满足 $0 \leq p < t$ 的整数 p 和任意的节点子集 X ,如果 $|X| = n - 2t + p$,那么 $|IX| > p$,其中 IX 表示以节点子集 X 中任意节点为起点的测试边的终点集合。

定理 2 是根据系统的入度和邻节点关系来判定系统是否是一步 t -可诊断系统。当系统的总节点数 n 比故障节点数 t 的两倍还多,并且系统中任意节点的入度都大于 t 时,对于任意一个小于 t 的正整数 p ,如果系统中的任意节点数为 $n - 2t + p$ 的节点子集 X 都有超过 p 个邻节点,那么系统是一步 t -可诊断系统。

引理 3^[10] 系统是一步 t -可诊断系统,当且仅当每一对故障集合 V_f 和 V'_f , $|V_f|, |V'_f| \leq t$,至少有一个属于 $V - V_f - V'_f$ 的节点到 $V_f \Delta V'_f$ ($V_f \Delta V'_f = (V_f - V'_f) \cup (V'_f - V_f)$) 的某个节点有边连接,如图 1 所示。

顺序 t -可诊断是通过反复迭代的方式来诊断系统的故障集合,每一次迭代至少要有一个新的故障节点被确认,这个被确认的故障节点子集会在下一次迭代开始之前被维修和替换,

迭代会一直持续下去,直到所有的故障节点被确认并被维修替换为止。顺序 t -可诊断是一个多步的故障诊断方式,顺序 t -可诊断可以有效地提高系统的诊断能力,但是需要以牺牲时间复杂度为代价,这对于诊断的及时性是一个挑战。顺序 t -可诊断允许系统多次产生症候,也就是说,系统存在着多个与给定症候相容的故障集合,其中任意一个故障集合都有产生相同症候的可能。

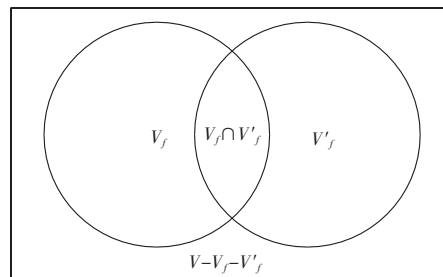


图 1 故障集合 V_f 和 V'_f 示意图

顺序 t -可诊断提出的目的是希望在与一步 t -可诊断具有相同的诊断能力的情况下可以大规模减少系统的测试边。文献[2]给出了一种由 n 个节点组成的系统设计方案,它只要求 $n + 2t - 2$ 条测试边就可以形成一个顺序 t -可诊断系统,而同样的诊断能力对于一步 t -可诊断系统至少需要 nt 条测试边。

由于 t -可诊断没有对故障节点的位置以及节点之间的关系进行限制,所以, t -可诊断的诊断能力也就是它的诊断度与系统总节点数的占比很小。以 n 维超立方体为例,它的 t -可诊断的诊断度仅仅为 n ,与总节点数的比例仅为 $n/2^n$,当 $n \geq 10$ 时 $n/2^n < 1\%$,也就说明了 t -可诊断的诊断能力很低。

1.2 t/s -可诊断

为了提高系统的诊断能力同时避免诊断的延时,1975 年 Friedman^[3]以牺牲诊断的精确性为代价提出了 t/s -可诊断, t/s -可诊断是一种新的诊断策略,它允许误诊断的存在。 t/s -可诊断指的是对于任何给定的症候以及满足 $t \leq s$ 的正整数 t 和 s ,当故障节点数目不超过 t 时,所有的故障节点可以被孤立在一个大小不超过 s 的节点集合中。

对于 t/s -可诊断系统而言,设系统的故障集合为 F ,当 $|F| \leq t$ 时,根据症候可将系统的所有故障节点识别到一个节点集合 F' 中, $|F'| \leq s$ 并且 $n \geq s$,那么系统有 $|F'| - |F|$ 个被误诊为故障的节点。因此, t/s -可诊断有着非常明显的缺点,那就是它的误诊断节点数目的上限最高可达 $s - 1$ 个,而当系统的故障节点只有 1 个时,这种情形下被误诊断的节点数目比真正的故障节点数目要大得多,由此诊断结果也没有意义。

t/s -可诊断也有两种类型,分别是一步 t/s -可诊断和顺序 t/s -可诊断。1979 年, Karunanithi 等人^[11]对两种典型的系统——单环系统和 D_{84} 系统的一步 t/s -可诊断和顺序 t/s -可诊断展开研究,得出这两种系统的一步 t/s -可诊断和顺序 t/s -可诊断的充要条件都与 t -可诊断的充要条件相关联,同时给出了一个高效的一步 t/s -可诊断的维修替换程序。显然,即使 $s = n - 1$ 时的 t/s -可诊断研究难度都非常大^[12],由此严重制约了 t/s -可诊断的研究和发展。而当 $t = s$ 时, t/s -可诊断表现出诸多性能优势,那就是 t/s -可诊断的特例—— t_1/t_1 -可诊断。

1.3 t_1/t_1 -可诊断

t_1/t_1 -可诊断是 1978 年 Karunanithi 等人^[4]提出的一种系

统级故障诊断的可诊断理论。 t_1/t_1 -可诊断要求在故障节点数不超过 t_1 的情况下,所有的故障节点可以被孤立在一个大小不超过 t_1 的节点集合中。根据 t -可诊断和 t_1/t_1 -可诊断的定义可知,在一个既满足 t -可诊断又满足 t_1/t_1 -可诊断的系统中,设系统的故障集合为 F ,当 $|F| \leq t$ 时故障集合 F 可以被全部诊断出来。当 $t < |F| \leq t_1$ 时,系统的故障集合 F 可以被孤立在一个节点集合 R 中, $|R| \leq t_1$ 。显然,存在着 $|R| - |F|$ 个被误诊断的正常节点。而当故障节点数目等于 t_1 时,根据 t_1/t_1 -可诊断的定义可知,这 t_1 个故障节点可以被全部确定,也就是不存在被误诊断的正确节点。但是这并不表明系统是 t_1 -可诊断系统,因为这只是表明当故障节点数目等于 t_1 时可以被精确诊断,而当故障节点数目小于 t_1 时,仍然可能出现被误诊断的正确节点。之后,Kavianpour 等人^[4]进一步用 $n \lceil (t_1 + 1)/2 \rceil$ 条边构造一个 t_1/t_1 -可诊断系统,相比于要构造一个 t_1 -可诊断系统而言,它的测试边规模只是构造一个 t_1 -可诊断系统所需的一半,这也体现出 t_1/t_1 -可诊断降低了构建成本的优点。1981年 Chwa 等人^[12]在研究 t_1/t_1 -可诊断判定特征的基础上,给出了 t_1/t_1 -可诊断的充要条件,如定理3所示。

定理3^[12] 设一个包括 n 个节点的系统 S , S 是 t_1/t_1 -可诊断系统,当且仅当对于每一个满足 $0 \leq p < t_1$ 的正整数 p 和节点子集 V' ,其中 $|V'| = 2(t_1 - p)$,那么 $|\Gamma^{-1}(V')| > p$, $\Gamma^{-1}V'$ 表示以节点集合 V' 中任意节点为终点的测试边的起点集合。

定理3是 t_1/t_1 -可诊断的判定规则,与定理2类似,它利用了节点集合的节点数目与邻节点数目之间的关联关系来进行判定。定理3也表明 t_1/t_1 -可诊断系统和 t_1 -可诊断系统一样,都要求 $n > 2t_1$ 。

1986年,Yang 等人^[13]通过研究发现, t_1/t_1 -可诊断系统中至多只有一个故障节点不能被正确诊断,同时所有的故障节点都会被圈定在一个大小不超过 t_1 的节点集合中。因此,只需要付出一个节点被误诊断的代价, t_1/t_1 -可诊断就可以较大幅度地提高系统的诊断能力。 t_1/t_1 -可诊断是 t/s -可诊断的一种特例,相较之与 t/s -可诊断, t_1/t_1 -可诊断可以降低误诊断率;而与 t -可诊断相比, t_1/t_1 -可诊断同样可以节省近一半的测试边。

1.4 t/k -可诊断

由于 t/s -可诊断中允许存在着较大比例的被误诊断的节点,并且这种可诊断方式对于实际被误诊断的节点数目难以控制,特别是当故障集合只是一个节点时,它的误诊断比例显然不可接受。基于此,1996年 Somani 等人^[5]提出了 t/k -可诊断。 t/k -可诊断认为当系统的故障集合 F 满足 $|F| \leq t$ 时,根据症状可将系统的所有故障节点识别到一个集合 F' 中, F' 中至多有 k 个被误诊断的节点,即 $|F'| \leq |F| + k$ 。通常在实际的处理过程中都会设定 $t > k$,因为如果 $t \leq k$,那么表示被误诊断为故障节点的数目要超过实际的故障节点数目,这也是不可接受的。

t/k -可诊断、 t -可诊断和 t_1/t_1 -可诊断这三种可诊断之间密切相关,可以说 t -可诊断和 t_1/t_1 -可诊断都是 t/k -可诊断的特殊情况。具体来说,当 $k = 0$ 时 t/k -可诊断就是 t -可诊断;当 $k = 1$ 时 t/k -可诊断就是 t_1/t_1 -可诊断,其中 $t_1 = t$ 。 t -可诊断、 t_1/t_1 -可诊断和 t/k -可诊断之间的关系如图2所示。

同时 Somani 等人进一步对 t/k -可诊断的充分条件和必要条件进行了研究,得出了定理4和5。

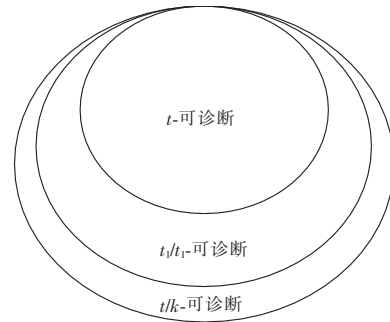


图2 t -可诊断、 t_1/t_1 -可诊断和 t/k -可诊断关系

定理4^[5] 一个由 n 个节点组成的系统 S 用 $G(V, E)$ 表示,如果 S 是一个 t/k -可诊断系统,那么必然满足以下两个条件:

a) 对于每一个正整数 p ,其中 $1 \leq p \leq k+1$, $|V'| = k+p$, $|\Gamma^{-1}(V')| > t - (k+1)$;

b) 对于每一个正整数 p ,其中 $1 \leq p \leq k+1$, $|V'| = 2(k+p)$, $|\Gamma^{-1}(V')| > t - (k+p)$ 。

根据定理4可知,在一个 t/k -可诊断系统中,节点数大于 $k+1$ 小于 $2k+1$ 的节点集合 V' 满足 $|\Gamma^{-1}(V')| > t - (k+1)$,而节点数大于 $2(k+1)$ 小于 $2(2k+1)$ 的节点集合 V' 满足 $|\Gamma^{-1}(V')| > t - (k+p)$ 。

定理5^[5] 一个由 n 个节点组成的系统 S 用 $G(V, E)$ 表示,那么满足以下两个条件时系统 S 是一个 t/k -可诊断系统。

a) 对于每一个正整数 p ,其中 $1 \leq p \leq k+1$, $|V'| = k+p$, $|\Gamma^{-1}(V')| > t - p$;

b) 对于每一个正整数 p ,其中 $1 \leq p \leq k+1$, $|V'| = 2(k+p)$, $|\Gamma^{-1}(V')| > t - (k+p)$ 。

定理5是 t/k -可诊断的判定定理。定理4和5在条件a)中存在着一些明显的差异,以至于无法合并为一个统一的充要条件定理。文献[5]通过分析孤立节点集合与故障集合之间存在内部关联的方式说明了在条件a)中存在差异的具体原因。

t/k -可诊断是非精确可诊断中可以有效控制误诊断节点数目,并且提高诊断能力的一种较为理想的可诊断方式。但是由于误诊断的存在, t/k -可诊断仍然表现出缺乏经济性的缺点。

1.5 t_i -可诊断和 t_n/t_m -可诊断

以上可诊断性考虑的都是“永久性”故障,也就是一种永久性存在的故障。但是现实生活中还会经常出现所谓的“间歇性”故障,也就是故障的出现是不持续的,有时发生故障,有时又正常运行。因此,需要在系统级故障诊断的可诊断研究中考虑发生“间歇性”故障的情况。

1969年 Ball 等人^[14]指出当一个节点发生间歇性故障时,有必要对其进行多次测试,直到得到一个正确的评价。由此可知,当一个正确的节点没有充分测试一个“间歇性”故障节点时,那么它对该故障节点的测试就有可能不正确,也就是说它可能会把该间歇性故障节点评价为“正确”节点。因此,间歇性可诊断认为一个正确的节点对另一个正确的节点的评价总是正确的,而一个正确的节点对一个故障的节点进行评价,如果测试不充分,那么评价结果可能不正确。对于间歇性可诊断而言,测试需要反复进行,直到故障节点被正确评价为止。每

一个测试完成之后,将形成一个升级症候^[7]。显然,升级症候是症候的一个子症候。因此在故障诊断中,确定为故障节点的评价总是正确的,而对于正确的评价也可以解释为可能是不完全的诊断测试,这是因为存在着间歇性故障没有被充分测试的可能。

系统级故障诊断中针对“间歇性”故障的可诊断性被称为 t_i -可诊断。 t_i -可诊断指的是当间歇性故障节点数不超过 t_i 时,任意一个正确的节点都不会被诊断为故障节点,也就是说 t_i -可诊断只会是诊断不完全,而永远不会不正确。

1978 年 Mallela 等人进一步给出了 t_i -可诊断的充要条件,如定理 6 所示。

定理 6^[6] 系统是 t_i -可诊断,当且仅当对于满足 $|S_1|, |S_2| \leq t_i$ 和 $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ 的两个节点集合 S_1 和 S_2 , 设 $R = V - (S_1 \cup S_2)$, 节点集合 S_1 和 S_2 都至少有一条来自 R 的测试边。

定理 6 是 t_i -可诊断的判定定理。对于故障节点数小于 t_i 并且相交为空的两个节点集合 S_1 和 S_2 , 如果 S_1 和 S_2 都存在一条来自 R 的边,那么系统是 t_i -可诊断。

现实中只有永久性故障节点或者只有间歇性故障节点的可能性都较小,真实情况往往是永久性故障节点和间歇性故障节点同时存在。基于此,1980 年 Mallela 等人^[7]又进一步提出了系统级故障诊断的混合性可诊断理论,也就是 t_h/t_{hi} -可诊断,其中 t_h 表示允许的最大故障节点数, t_{hi} 表示允许的最大间歇性故障节点数, $0 \leq t_{hi} \leq t_h$ 。当 $t_{hi} = 0$ 时表示所有的故障节点都是永久性故障节点,而当 $t_h = t_{hi}$ 时表示故障节点的数目在永久性故障节点和间歇性故障节点两类别的分配上没有限制。Mallela 等人给出了 t_h/t_{hi} -可诊断的充要条件,如定理 7 所示。

定理 7^[7] 系统是 t_h/t_{hi} -可诊断系统,当且仅当对于满足 $|S_1|, |S_2| \leq t_h$ 和 $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ 的两个节点集合 S_1 和 S_2 , 满足以下两个条件之一:

- a) $\Gamma^{-1}(S_1) \not\subseteq S_2$;
- b) $|\Gamma(V - S_1 - S_2)| > t_h + t_{hi} - |S_1|$ 。

定理 7 是 t_h/t_{hi} -可诊断的判定定理,表示对于故障节点数不超过 t_h 并且相交为空的两个节点集合 S_1 和 S_2 , 如果以 S_1 中任意节点为终点的测试边的起点集合不属于 S_2 , 或者以 $V - S_1 - S_2$ 中任意节点为起点的测试边的终点节点数大于 $t_h + t_{hi} - |S_1|$, 那么系统是 t_h/t_{hi} -可诊断系统。由 t -可诊断和 t_h/t_{hi} -可诊断的定义以及定理 7 可知,当系统是 t -可诊断系统同时也是 t_h/t_{hi} -可诊断系统时,如果存在 $\lfloor 2t/3 \rfloor < t_h \leq t$, 那么 $t_{hi(\max)} \geq 2(t - t_h)$ 。

目前为止,系统级故障诊断中有关 t_i -可诊断和 t_h/t_{hi} -可诊断的研究基本上都是基于 PMC 模型,对于其他诊断模型(比如 MM 模型)的研究相对较少,并且涉及范围有限。

1.6 条件 t -可诊断

条件 t -可诊断是 2005 年 Lai 等人^[8]提出的一种限定故障集合的可诊断方式,是在 t -可诊断基础上进一步拓展的可诊断理论。条件 t -可诊断要求系统中的每一个节点至少有一个正确(未发生故障)的邻节点。因此,对于系统 $G(V, E)$ 而言,设 F 表示系统的一个故障集合,条件 t -可诊断要求系统 G 中的任意节点都至少有一个邻节点属于 $G - F$ 。需要注意的是条件 t -可诊断限制的是所有的节点,包括故障节点和正常节点。

条件故障集合指的是满足条件 t -可诊断定义的故障集合。满足条件 t -可诊断的系统被称为条件 t -可诊断系统,可根据定理 8 进行判定。

定理 8^[8] 系统是条件 t -可诊断系统,当且仅当系统中所有节点数目小于等于 t 的条件故障集合都两两可区分。

定理 8 是利用条件故障集合之间的可区分性来对系统是否是条件 t -可诊断系统进行判定。它首先要求得出系统所有故障节点数不超过 t 的条件故障集合,然后进行两两可区分性判定,如果不存在不可区分的条件故障集合,那么系统是条件 t -可诊断系统。

条件 t -可诊断的诊断能力用条件诊断度 t_c 表示,具体来说条件诊断度 t_c 指的是系统满足条件 t -可诊断时, t 可以取到的最大正整数^[8]。

条件 t -可诊断是以牺牲小概率事件为代价大幅度提高系统诊断能力的一种新的可诊断理论。以 n 维超立方体为例, n 维超立方体的 t -可诊断的诊断度为 n , 而 n 维超立方体的条件诊断度为 $4(n-2)+1$, 其诊断能力的提高显而易见。

1.7 g 正确邻节点条件 t -可诊断

g 正确邻节点条件 t -可诊断是 2012 年 Peng 等人^[9]提出的另一种限定故障集合的可诊断方式, g 正确邻节点条件 t -可诊断是条件 t -可诊断基础上进一步拓展的可诊断理论。 g 正确邻节点条件 t -可诊断要求系统中的每一个正确的节点至少有 g 个正确的邻节点。也就是对于系统 G 而言, 当 $G - F$ 不连通时, $G - F$ 中的每一个连通分支 C 都满足 $P_g(C)$, $P_g(C)$ 表示连通分支 C 中的每一个节点都至少有 g 个邻节点属于 C 。需要注意的是条件 t -可诊断限制的是所有节点,包括故障节点,而 g 正确邻节点条件 t -可诊断限制的只是正确节点。所以本质上说 g 正确邻节点条件 t -可诊断和条件 t -可诊断不同,也就是说条件 t -可诊断并不是 $g = 1$ 时的 g 正确邻节点条件 t -可诊断。

g 正确邻节点条件故障集合指的是满足 g 正确邻节点条件 t -可诊断定义的故障集合。满足 g 正确邻节点条件 t -可诊断的系统被称为 g 正确邻节点条件 t -可诊断系统,可根据定理 9 判定。

定理 9^[9] 系统是 g 正确邻节点条件 t -可诊断系统,当且仅当系统的故障节点数小于等于 t 时,系统的所有 g 正确邻节点条件故障集合都两两可区分。

定理 9 和条件 t -可诊断的判定定理一样,它是利用 g 正确邻节点条件故障集合的可区分性来进行判定。

g 正确邻节点条件 t -可诊断系统的诊断能力用 g 正确邻节点条件诊断度 t_g 表示,具体来说 g 正确邻节点条件诊断度 t_g 指的是系统满足 g 正确邻节点条件 t -可诊断时, t 可以取到的最大正整数^[9]。

g 正确邻节点条件 t -可诊断是通过加大条件限制强度的方式来进一步提高系统诊断能力的可诊断性理论。以 n 维超立方体为例, n 维超立方体的 g 正确邻节点条件诊断度为 $2^g(n-g)+2^g-1$, 相比于 n 维超立方体的条件诊断度 $4(n-2)+1$, g 正确邻节点条件诊断度又提高了很多倍。

2 系统级故障诊断的可诊断性研究展望

根据系统级故障诊断的可诊断性研究现状,本文对未来的

研究方向进行展望,具体包括系统级故障诊断的可诊断性扩展研究、可诊断性的诊断度研究和可诊断性的诊断算法研究三个方面,并结合系统级故障诊断的前期应用领域对系统级故障诊断方法的工程应用潜力和前景进行了研究。

2.1 系统级故障诊断的可诊断性扩展研究

系统级故障诊断的可诊断性研究经历了半个世纪之后,已经发展成一个具有多重针对性的可诊断性集合。其中条件可诊断中的 g 正确邻节点条件 t -可诊断是针对高维新型互连网络诊断性的最新研究成果, g 正确邻节点条件 t -可诊断是在切合应用实际的基础上以较低的代价呈几何级数地提高了系统的诊断度,增强了系统的可靠性。但是需要注意的是 g 正确邻节点条件 t -可诊断限制的只是正确的节点,对于故障的节点没有限制。现实情况中看高维新型互连网络系统中的故障节点也同样满足这种限制,即故障节点也至少有 g 个正确的节点与之相邻,所以 g 正确邻节点条件 t -可诊断存在着进一步扩展的可能。

2.2 可诊断性的诊断度研究

可诊断性的诊断度研究主要是针对以超立方体为代表的新型互连网络拓扑结构进行诊断度的求取。到目前为止,关于各种新型互连网络拓扑结构的 t -可诊断的各种诊断度都被求出^[16~19],基本上都与该拓扑结构的连通度直接关联。

非精确可诊断中 t/s -可诊断的诊断度由于研究难度巨大,成果较少。 t_1/t_1 -可诊断方面,文献[20]给出了超立方体 t_1/t_1 -可诊断的诊断度为 $2n-2$,文献[21]得出了增强立方体在 t_1/t_1 -可诊断的诊断度为 $2n$,文献[17]得出莫比乌斯立方体 t_1/t_1 -可诊断的诊断度为 $2n-2$,文献[18]进一步研究得出交叉立方体 t_1/t_1 -可诊断的诊断度也为 $2n-2$ 。 t/k -可诊断方面,文献[22]证明了交换超立方体是 $t_1(s,k)/k$ -可诊断,其中 $t_1(s,k) = (k+1)(s+1) - (k+1)(k+2)/2 + 1$ 。文献[23]通过研究得出:包括超立方体、交叉立方体、莫比乌斯立方体和扭立方体在内的BC网络都是 $t(n,k)/k$ -可诊断,其中 $n \geq 4, n \geq k \geq 0, t(n,k) = (k+1)n - \frac{1}{2}(k+1)(k+2) + 1$ 。

自2005年开始,多种新型互连网络的条件 t -可诊断的诊断度也被相继求出,包括超立方体^[8,24~26]、莫比乌斯立方体^[24,25,27]、扭立方体^[24,25,27]、局部扭立方体^[24,25,27]、交叉立方体^[25,27]和平衡立方体^[28,29]。但是对于其他立方体,包括交换立方体、交换交叉立方体的条件诊断度研究还未涉及。

而新型互连网络的 g 正确邻节点条件 t -可诊断的诊断度方面,至目前为止,只求出了超立方体、交换超立方体和 k 元 n 立方体的 g 正确邻节点条件诊断度^[9,15,30],其他的诸多新型互连网络拓扑结构的 g 正确邻节点条件诊断度都没有涉及。

目前,针对新型互连网络的各种诊断性的诊断度研究取得了一系列的研究成果,但是还存在着相当一部分的研究空白,未来可以在这些方面进行有针对性的研究。

2.3 可诊断性的诊断算法

新型互连网络诊断性的应用需要有针对性的算法支撑,算法的优劣直接影响着诊断效果,算法的时间复杂度和空间复杂度是衡量一个算法的主要性能指标。由于垂直写入技术的高速发展,存储容量成几何级数增长,所以算法的空间复杂度相

对而言已经不需要过多考虑,这就更进一步凸显出诊断算法时间复杂度在新型互连网络故障诊断中的重要性。有关 t -可诊断的算法研究受到持续的关注,目前研究人员已提出了多种关于 t -可诊断的算法^[31~34],文献[34]中提出的算法时间复杂度为 $O(n^{2.5})$ 最为优化。之后其他诊断性算法也陆续被提出,如 t_1/t_1 -可诊断算法^[35~38]、环诊断算法^[39,40]和条件故障诊断算法^[41,42],其中Ye等人^[39,40]利用哈密尔顿性提出了复杂度接近线性的PMC模型和MM模型下的环诊断算法。以上算法针对的是通用网络和超立方体,而对于其他新型互连网络的诊断算法研究涉及较少,并且学界普遍认为诊断度越大算法的难度也就越大,因此在有效的控制时间复杂度的基础上进行的新型互连网络的各种诊断算法设计势必更加复杂,也是未来研究的一个重要方向。

2.4 系统级故障诊断方法的工程应用潜力和前景

系统级故障诊断中的可诊断性研究最早是美国军方的资助项目,并持续得到了美国海军研究办公室、陆军通信兵和空军共同成立的联合电子学服务计划(joint services electronics program, JSEP)的资助^[2,6,7,11,12]。所以系统级故障诊断研究的早期成果都服务于军事工业,特别是航空电子设备的故障诊断方面。之后,系统级故障诊断开始应用于容错计算、路由算法和网络嵌入等多个方面。当前,世界各国都在大力推进电子、通信和网络可靠性问题的研究。我国也不例外,2006年国务院发布的《国家中长期科学技术发展(2006—2020年)》中明确提出“以发展高可信网络为重点,开发网络安全技术及相关产品,建立网络安全技术保障体系”。因此,在得到系统级故障诊断相关可诊断性参数和论断的基础上,可以把系统级故障诊断的各种诊断方法应用于超级计算机系统设计的可靠性评价、高速信息网的路由算法设计以及智能电网的性价评测等实际工程。同时系统级故障诊断方法可为电力电子电路故障诊断特别是赋时系统的组合诊断模型^[43~45]上的故障诊断提供有益的技术借鉴。

3 结束语

本文首先对系统级故障诊断中的可诊断性研究现状进行系统阐述和分析,指出了系统级故障诊断各种可诊断性的优缺点以及之间存在的继承体系;然后对可诊断性的研究领域和研究热点进行展望,指出未来有待进一步研究的三个方向,具体包括可诊断性的扩展研究、可诊断性的诊断度研究和可诊断性的诊断算法研究。本文系统地论述了系统级故障诊断中可诊断性的研究与发展,为后续的研究提供了宝贵的理论基础并指引了研究方向。

参考文献:

- [1] Somani A K. System level diagnosis: a review [R]. Iowa State: Iowa State University, 1997.
- [2] Preparata F P, Metze G, Chien R T. On the connection assignment problem of diagnosable systems [J]. IEEE Trans on Electronic Computers, 1967, 16(12): 848-854.
- [3] Friedman A D. A new measure of digital system diagnosis [C]//Proc of the 5th International Symposium on Fault Tolerant Computing. 1975: 167-170.

- [4] Kavianpour A, Friedman A D. Efficient design of easily diagnosable systems[C]//Proc of the 3rd USA-Japan Computing Conference. San Francisco:IEEE Computer Society, 1978:252-257.
- [5] Somani A K, Peleg O. On diagnosability of large fault sets in regular topology-based computer systems[J]. IEEE Trans on Computers, 1996, 45(8):892-903.
- [6] Mallela S, Masson G M. Diagnosable systems for intermittent faults[J]. IEEE Trans on Computers, 1978, C-27(6):560-566.
- [7] Mallela S, Masson G M. Diagnosis without repair for hybrid fault situations[J]. IEEE Trans on Computers, 1980, C-29(6):461-470.
- [8] Lai P L, Tan J J M, Chang C P, et al. Conditional diagnosability measures for large multiprocessor systems[J]. IEEE Trans on Computers, 2005, 54(2):165-175.
- [9] Peng Shaolun, Lin Chengkuan, Tan J J M, et al. The g -good-neighbor conditional diagnosability of hypercube under PMC model[J]. Applied Mathematics and Computation, 2012, 218(21):10406-10412.
- [10] Hakimi S L, Amin A T. Characterization of connection assignment of diagnosable systems[J]. IEEE Trans on Computers, 1974, 23(1):86-88.
- [11] Karunanithi S, Friedman A D. Analysis of digital systems using a new measure of system diagnosis[J]. IEEE Trans on Computers, 1979, C-28(2):121-133.
- [12] Chwa K Y, Hakimi S L. On fault identification in diagnosable systems[J]. IEEE Trans on Computers, 1981, 30(6):414-422.
- [13] Yang C L, Masson G M, Leonetti R A. On fault isolation and identification in t_1/t_1 -diagnosable systems[J]. IEEE Trans on Computers, 1986, C-35(7):639-643.
- [14] Ball M, Hardie F. Effects and detection of intermittent failures in digital systems[C]//Proc of Fall Joint Computer Conference. New York:ACM Press, 1969:329-335.
- [15] 刘秀丽, 原军, 马雪. 交换超立方体在 PMC 模型下的 g 好邻条件诊断度[J]. 太原科技大学学报, 2014, 35(5):390-393.
- [16] Armstrong J R, Gray F G. Fault diagnosis in a Boolean n cube array of microprocessors[J]. IEEE Trans on Computers, 1981, C-30(8):587-590.
- [17] Fan Jianxi. Diagnosability of the Möbius cubes[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 1998, 9(9):923-928.
- [18] Fan Jianxi. Diagnosability of crossed cubes under two strategies[J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(5):456-462.
- [19] 樊建席, 何力勤. BC 互连网络及其性质[J]. 计算机学报, 2003, 26(1):84-90.
- [20] Kavianpour A, Kim K H. Diagnosabilities of hypercubes under the pessimistic one-step diagnosis strategy[J]. IEEE Trans on Computers, 1991, 40(2):232-237.
- [21] Wang Dajin. Diagnosability of enhanced hypercubes[J]. IEEE Trans on Computers, 1994, 43(9):1054-1061.
- [22] 黄莹, 梁家荣, 叶良程. 交换超立方体网络的 t_1/k -诊断度研究[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(9):2054-2057.
- [23] Fan Jianxi, Lin Xiaola. The t/k -diagnosability of the BC graphs[J]. IEEE Trans on Computers, 2005, 54(2):176-184.
- [24] Zhu Qiang. On conditional diagnosability and reliability of the BC networks[J]. Journal of Supercomputing, 2008, 45(2):173-184.
- [25] Xu Min, Thulasiraman K, Hu Xiaodong. Conditional diagnosability of matching composition networks under the PMC model[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2009, 56(11):875-879.
- [26] Hsu G H, Chiang C F, Shih L M, et al. Conditional diagnosability of hypercubes under the comparison diagnosis model[J]. Journal of Systems Architecture, 2009, 55(2):140-146.
- [27] Yang M C. Conditional diagnosability of matching composition networks under the MM model[J]. Information Sciences, 2013, 233(1):230-243.
- [28] Yang M C. Conditional diagnosability of balanced hypercubes under the PMC model[J]. Journal of Supercomputing, 2013, 222(3):754-760.
- [29] Yang M C. Conditional diagnosability of balanced hypercubes under the MM model[J]. Journal of Supercomputing, 2013, 65(3):1264-1278.
- [30] Yuan Jun, Liu Aixia, Liu Xiuli. The g -good-neighbor conditional diagnosability of k -ary n -cubes under the PMC model and MM^* model[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2015, 24(13):1324-1337.
- [31] Sullivan G F. ($t^3 + |E|$) fault identification algorithm for diagnosable systems[J]. IEEE Trans on Computers, 1988, 37(4):388-397.
- [32] Kameda T, Toida S, Allan F J. A diagnosing algorithm for networks[J]. Information and Control, 1975, 29(2):141-148.
- [33] 彭宇, 洪炳熔, 乔永强. 基于通用比较模型的 t -可诊断系统的特征化及并行诊断算法[J]. 计算机学报, 2000, 23(2):126-133.
- [34] Dahbura A T, Masson G M. An $O(n^{2.5})$ fault identification algorithm for diagnosable systems[J]. IEEE Trans on Computers, 1984, C-33(6):486-492.
- [35] Yang Xiaofan. A fast pessimistic one-step diagnosis algorithm for hypercube multicomputer systems[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2004, 64(4):546-553.
- [36] Tsai C. A quick pessimistic diagnosis algorithm for hypercube-like multiprocessor systems under the PMC model[J]. IEEE Trans on Computers, 2013, 62(2):259-267.
- [37] Dong Tao. A linear time pessimistic one-step diagnosis algorithm for hypercube multicomputer systems[J]. Parallel Computing, 2005, 31(8):933-947.
- [38] Yang Xiaofan, Tang Yuanyan. A $(4n-9)/3$ diagnosis algorithm on n -dimensional cube network[J]. Information Sciences, 2007, 177(8):1771-1781.
- [39] Ye Liangcheng, Liang Jiarong. Five-round adaptive diagnosis in Hamiltonian networks[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(9):2459-2464.
- [40] Ye Liangcheng, Liang Jiarong, Lin Haixiang. A fast pessimistic diagnosis algorithm for hypercube-like networks under the comparison model[J]. IEEE Trans on Computers, 2016, 65(9):2884-2888.
- [41] 郭晨, 梁家荣, 葛志辉, 等. 基于互测 PMC 模型的条件诊断算法[J]. 电子学报, 2015, 43(2):255-261.
- [42] 郭晨, 梁家荣, 冷明. 基于 PMC 模型的条件故障诊断[J]. 电子学报, 2015, 43(11):2331-2337.
- [43] 朱大奇, 于盛林. 基于 D-S 证据理论的数据融合算法及其在电路故障诊断中的应用[J]. 电子学报, 2002, 30(2):221-223.
- [44] 张志学. 基于混杂系统理论的电力电子电路故障诊断[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [45] 刘佳. 基于混杂系统模型的电力电子电路故障诊断[D]. 天津:天津大学, 2010.