

一个基于并行集团的系统级故障概率诊断算法

张大方¹, 陈兴华¹, 宣恒农²

(1. 湖南大学计算机与通信学院, 湖南长沙 410082; 2. 南京经济学院计算机系, 江苏南京 210003)

摘要: 概率诊断算法是系统级故障诊断研究的一个重要方面, 本文提出了一种基于并行集团的概率诊断算法—PGSFPD 算法, 并设计了一个系统级故障诊断软件仿真系统, 对诊断算法进行仿真, 分析比较各算法的性能, 仿真结果表明 PGSFPD 算法性能优于经典的概率诊断算法—Somani & Agrawal 算法, 可在只需较少测试数的情况下, 在保持很高诊断正确率的同时, 大大降低系统的规模。

关键词: 系统级故障诊断; 集团; 概率诊断; 诊断算法; 软件仿真

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 02-0180-03

An System-Level Fault Probabilistic Diagnosis Algorithm Based on Parallel Group

ZHANG Da-fang¹, CHEN Xing-hua¹, XUAN Heng-nong²

(1. College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

2. Dept. of Computer, Nanjing Economy College, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: Consider a system composed of N nodes that can be faulty or fault-free. The purpose of system-level fault diagnosis is to have each fault-free node determine the state of all nodes of the system. Probabilistic diagnosis algorithm is very important in the system level fault diagnosis research. A system-level fault probabilistic diagnosis algorithm based on parallel group was proposed, PGSFPD algorithm, and the software emulation system of system-level fault diagnosis was presented. Experimental results are given through simulation of the algorithm for large systems of from 200 nodes to 1000 nodes under the emulation system. The results indicate the PGSFPD algorithm has better performance than the Somani & Agrawal algorithm, which is a classic probabilistic algorithm in system level fault diagnosis.

Key words: system-level fault diagnosis; node grouping; probabilistic diagnosis; diagnosis algorithm; software emulation

1 引言

随着计算机系统应用的日益广泛, 计算机系统的安全性和稳定性变得十分重要。系统级故障诊断概念由 Preparata^[1] 等于 1967 年提出, 运用图论模型对计算机系统进行故障诊断。其基本思想是: 让系统中的处理机相互测试, 通过对测试结果进行逻辑分析, 找出系统中的故障处理机。设一个由 n 个处理机组成的系统, 用集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 表示, 对每一个属于 U 的处理机 u_i , 分配一个 U 的子集供其测试。用有向图 $G(U, E)$ 表示测试情况。其中 U 中每一个顶点 u_i 表示一个处理机, E 是系统中所有测试边的集合, E 中每条边 (u_i, u_j) 表示 u_i 测试 u_j 。测试结果用二进制变量 a_{ij} 表示, 若 u_j 通过了 u_i 的测试, 则 $a_{ij} = 0$, 若 u_j 未通过 u_i 的测试, 则 $a_{ij} = 1$; 若 u_i 和 u_j 之间没有测试, 则 a_{ij} 赋空值。系统级故障诊断中, 最主要的测试模型是 PMC 模型。PMC 模型假定: 正常机的测试结果可信, 故障机的测试结果不可信。

从 1967 年至今的三十多年时间里, 人们在系统级故障诊断领域已经研究出若干富有成效的诊断算法, 并将这些研究成果广泛应用于局域网、无线移动网络、超立方体等^[2~7]。系统级故障诊断当前被广义归类为确定性方法和概率性方法。确定性方法指: 对正常机和故障机行为作一假定, 限制系统中故障结点数上限, 并对测试图的结构作假定, 则对给定故障模式, 将唯一地确定全部故障机。而概率性方法对测试图结构不作限制, 对系统中故障结点数上限也不作限制, 只是试图高概率地诊断出故障机。大多数实际计算机系统很难满足确定性方法的要求, 却适合用概率性方法进行诊断。因此, 研究概率性方法是系统级故障诊断的一个重要方向^[8,9]。本文深入分析了经典的概率诊断算法—Somani & Agrawal 算法^[8], 利用文献^[10]的集团算法提出了一个基于并行集团的系统级故障概率诊断算法—PGSFPD 算法, 在诊断时间、诊断正确率等方面均优于文献^[8]。由于系统级故障诊断问题为 NP-Hard 问

收稿日期: 2002-05-22; 修回日期: 2002-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69973016); 广东省自然科学基金(No. 010475)

题,系统的规模一直是大部分算法的瓶颈.当系统规模增大时,大部分算法的性能急剧下降,而 PGSFPD 算法通过在小规模的集团级别上进行诊断而仍然能保持良好的性能.仿真实验结果表明,PGSFPD 算法在只需较少测试边数,并保持很高的诊断正确率(约为 95%)的情况下,可大大缩小系统的规模,从而大大降低诊断成本.

2 Somani & Agrawal 算法

Somani 和 Agrawal 1992 年提出了一个经典的系统级故障概率诊断算法——Somani & Agrawal 算法^[8].其基本思想为:在给定的系统中,每个结点根据其测试的结点集中大多数结点的测试结果决定其自身的状态.即采用“大多数投票法”.算法首先初始化所有结点为“永远好”或“永远坏”.然后利用“永远好”结点判别出“确定好”结点.再利用这些“确定好”结点去确定其他“确定好”结点和“确定坏”结点.算法中,在第一步初始化所有结点为“永远好”或“永远坏”时,采用大多数投票法.在第二步,利用“永远好”结点判别出“确定好”结点时,迭代使用大多数投票法.当某些结点被判定为“确定好”结点时,直接利用它们去判定其他结点为“确定好”或“确定坏”结点.第三步,把仍被标志为“永远好”和“永远坏”的结点标志为“确定好”和“确定坏”.

3 PGSFPD 算法

基于实际系统中大多数处理机是正常机的事实,文献[10]提出了集团的概念,并提出了集团算法.集团算法需要假定系统的测试结构.本文提出一种改进的基于并行集团的系统级故障概率诊断算法——PGSFPD 算法. PGSFPD 算法并行生成集团,把原来由中心机单独完成的工作分布到系统中全部结点上执行.生成集团时,中心机只执行按系统中结点数均分的一部分工作.只在集团生成后,再由中心机诊断出整个系统的故障状况.系统中集团是并行生成的.

极大独立点集生成算法:

```
(1) 找出邻接点数最小的结点  $i$ , 将  $i$  及其邻接点压入堆栈 NodeStack[ ], 把 NodeStack[ ] 头值赋给 actNode;
while (NodeStack[ ] 非空)
{ 设置初值;
  Vector[ ] = 0; // 用于保存集团邻接矩阵各行相加后所得向量
  LastStack[ ] = - 1; // LastStack 为放置最后找出的极大独立点集
  pointer = 0; // 指针指向 LastStack 栈头
  LastStack[pointer] = actNode;
  (2) while (finished = = false) // 包含 actNode 的极大独立点集未找完
  { 利用 Vector[ ] 寻找与 LastStack[ ] 中各点均不相邻且编号最大的点;
    if (存在符合条件结点)
      将该结点压入 LastStack[ ] 堆栈;
    else
      {LastStack[ ] 弹出栈头;
```

将 Vector[] 恢复为出栈结点入栈前的向量.

若此极大独立点集比此前找到的极大独立点集包含更多源结点,则输出该集合;

```
if (NodeStack[ ] 为空)
```

```
  finished = true; // 包含 actNode 的极大独立点集已找完
}
NodeStack[ ] 弹出栈头, 并置 actNode 为 NodeStack[ ] 头值;
finished = false; // 开始新一轮搜索;
}
```

(3) LastStack[] 中为包含源结点数最多的极大独立点集.

PGSFPD 诊断算法描述:

第一步:

调用并行生成集团方法,对给定测试图 G 经集团运算后生成诊断图 G_1 .

第二步:

调用极大独立点集生成算法,求 G_1 的所有极大独立点集.

第三步:

确定故障机集合.找出包含源结点最多的极大独立点集 $T, U-T$ 即为系统中全部故障机.

4 仿真系统设计思想

为比较各算法的性能,设计了一个仿真系统.仿真系统用测试图来模拟实际系统,用算法对测试图进行诊断模拟对实际系统的诊断.实际计算机系统拓扑结构复杂,各系统结构千差万别,系统中的结点数也相差很大.为尽量模拟出复杂多样的实际系统,仿真系统采用多种方法生成测试图.给定系统中结点数后,可给定故障结点数和测试边数,也可按一定比例按正态分布动态生成故障结点数和测试边数.在得出故障结点数和测试边数后,把故障结点随机分布在系统结点中,在保证生成的图连通的前提下,把测试边也随机分布在结点的相互测试中.对生成的测试图,让不同的算法对其进行诊断,分析比较各自所需的诊断时间,达到的诊断正确率.本仿真系统主要对集团算法和 Somani & Agrawal 算法进行仿真,比较二者性能.

5 仿真系统功能结构

仿真系统功能结构如下:

(1) 参数输入.实验时输入结点数 nodes,测试边数 edges,故障结点数 faults.有四种参数输入方法:(a) 输入结点数,测试边数,故障结点数;(b) 只输入结点数和故障结点数,动态生成测试边数;(c) 只输入结点数和测试边数,动态生成故障结点数;(d) 只输入结点数,动态生成故障结点数和测试边数.

(2) 故障结点的生成.根据输入的故障结点数或计算出来的按正态分布的故障结点数随机生成故障结点.

(3) 测试图的生成.已知结点数,故障结点数,测试边数,生成测试图:用红点表示故障结点,用绿点表示正常结点.在确保系统连通的情况下,把测试边随机分布在 n 个结点的相

互测试中(先用 $n-1$ 条测试边把 n 个结点串连起来,然后把余下的测试边随机分布在 n 个结点的相互测试中).对同一组数据(结点数、故障结点数、测试边数三者已知),可生成故障构成不同的测试图;对同一组数据(结点数、故障结点数、测试边数三者已知),在故障构成固定的情况下,可生成测试构成不同的测试图.

(4) 系统级故障诊断算法. 分别对串行生成集团的集团算法、并行生成集团的集团算法、概率诊断算法进行仿真. 对同一测试图用这些算法进行诊断, 比较它们的性能. 如诊断正确率、诊断时间等.

(5) 结果显示. 显示生成的集团数, 好集团个数, 坏集团个数, 每个集团的构成, 诊断正确率, 诊断时间等.

(6) 实验结果的保存. 算法每执行一次诊断, 都把实验结果保存在一个文本文件中, 以便对实验结果进行分析.

6 实验结果分析

为比较两算法的性能, 选择 5 组数据进行实验. 每次只给定结点数, 让故障结点数和测试边数按正态分布随机生成, 增加模拟系统的多样性, 以便更好地与实际系统拟合. 分别取含结点数为 200, 400, 600, 800, 1000 的系统, 每个算法诊断时, 根据给定结点数, 先随机生成故障点数和测试边数(实验中采用的测试边数约为系统结点数的 1.5 倍), 再根据生成的故障点数和测试边数, 随机生成故障点和系统测试图, 以使每次实验的测试图都略有不同, 扩大实验的覆盖范围. 为避免实验结果的偶然性, 对同一个测试图, 用同一个算法诊断 100 次, 然后取平均值作为实验数据. 诊断时间比较见图 1.

从图 1 可得出: 随着系统规模的增大, Somani & Agrawal 算法所需的时间呈渐近指数增长, 而 PGSFPD 算法所需时间呈渐近线性增长, PGSFPD 算法所需时间大大少于 Somani & Agrawal 算法. 诊断正确率比较见图 2. 从图 2 可以看出, PGSFPD 算法诊断正确率高于 Somani & Agrawal 算法.

从表 1 可得出, PGSFPD 算法生成集团数和系统结点数之比约为 1/20, 即大约以 5% 的比例缩小系统的规模. 即 PGSFPD 算法能大规模地缩小诊断系统的规模.

表 1

系统规模	200	400	600	800	1000
生成集团数	13	27	35	55	68

7 结束语

自 Preparata 等人首次将结点间相互测试抽象成图论模型

以来, 测试边数已成为系统级故障诊断的一个重要概念. 对测试边数要求过多, 一直是系统级故障诊断算法应用于实际系统的障碍. 一般算法很难在保证高诊断正确率的情况下, 降低所需的测试边数. 本文提出了一种改进的基于集团的概率诊断算法—PGSFPD 算法, 并设计了一个仿真系统, 对各个算法进行仿真, 用不同的算法诊断同一个模拟系统. 实验结果表明, 对同一模拟系统, PGSFPD 算法性能优于 Somani & Agrawal 算法. PGSFPD 算法在只需较少测试边数的情况下, 在保持很高的诊断正确率(约为 95%)的情况下, 可大大缩小系统的规模(约为 5%). 由于系统级故障诊断问题为 NP-Hard 问题, 系统的规模一直是大部分算法的瓶颈. 当系统规模增大时, 大部分算法的性能急剧下降. 而当系统规模增大时, PGSFPD 算法通过在小规模的集团级别上进行诊断而仍然保持良好的性能.

参考文献:

- [1] F P Preparata, et al. On the connection assignment problem of diagnosable systems[J]. IEEE Trans, 1967, COMP-16(12): 848 - 854.
- [2] M Bearden, R Bianchini. Efficient and fault-tolerant distributed host monitoring using system-level diagnosis[A]. Proceedings of the IFIP/IEEE International Conference on Distributed Platforms: Client/Server and Beyond[C]. Dresden, Germany: IFIP, 1996. 159 - 172.
- [3] Stefano Chessa, Paolo Santi. Comparison-based system-level fault diagnosis in Ad-Hoc networks[A]. Proceedings of the Symposium on Reliable and Distributed Systems[C]. New Orleans: SRDS, 2001. 28 - 31.
- [4] Douglas M Blough, Hongying W Brown. The broadcast comparison model for on-line fault diagnosis in multicomputer systems: theory and implementation[J]. IEEE Trans, 1999, COMP-48(5): 470 - 493.
- [5] Evangelos Kranakis, Andrzej Pelc. Better adaptive diagnosis of hypercubes[J]. IEEE Trans, 2000, COMP-49(10): 1013 - 1020.
- [6] Elias procopio Duarte Jr, Takashi Nanya. A hierarchical adaptive distributed system-level diagnosis algorithm [J]. IEEE Trans, 1998, COMP-47(1): 34 - 45.
- [7] Hsien-Sheng Hsiao, et al. Reaching fault diagnosis agreement under a hybrid fault model[J]. IEEE Trans, 2000, COMP-49(9): 980 - 986.
- [8] A K Somani, V K Agrawal. Diagnosis algorithms for regular interconnected structures[J]. IEEE Trans, 1992, COMP-41(5): 899 - 906.
- [9] Krzysztof Kiks, Andrzej Pelc. Globally optimal diagnosis in system with random faults[J]. IEEE Trans, 1997, COMP-46(2): 200 - 204.
- [10] ZHANG Da-fang, XIE Gao-gang, MIN Ying-hua. Node grouping in system-level fault diagnosis[J]. Journal of Computer Science & Technology, 2001, 24(5): 474 - 479.

作者简介:

张大方 男, 1959 年 4 月生于上海市, 博士, 现为湖南大学计算机与通信学院院长, 教授, 博士生导师, 主持国家自然科学基金项目 2 项, 主持国家 863 计划项目 1 项, 发表学术论文 100 余篇, 主编教材 4 本, 现兼任 IEEE 寄存器传输级及高级测试技术系列国际学术会议(WRILT) 指导委员会委员, 全国计算机远程与继续教育研究会副理事长, 中国计算机学会容错计算专委会委员兼测试与诊断学组副组长, 湖南省政协常委, 主要研究领域: 可信系统与网络、测试与诊断、软件工程等.