

基于非齐次线性方程组的系统级故障诊断方法

罗立宇^{1,2}, 张大方², 刘 兵²

(1. 株洲师范高等专科学校 数学与计算机系, 湖南 株洲, 412007;
2. 湖南大学 计算机与通信学院, 湖南 长沙, 410082)

摘要: 针对系统级故障诊断研究中的测试模型, 提出了非齐次线性方程组的方法, 把测试模型等价地转化为非齐次线性方程组, 从而以简明的方法寻找所有相容故障模式, 并进一步推出最优诊断. 理论分析和实验结果表明, 该方法相对于基于图论的传统方法更加实用, 其方程模型更加简洁明了.

关键词: 系统级故障诊断; 测试模型; 相容故障模式; 最优诊断

中图分类号: TP301 文献标识码: A 文章编号: 1005-9792(2003)02-0200-03

1 计算机系统级故障诊断原理

F. P. Preparata 运用图论模型对计算机系统进行故障诊断^[1]. 其原理是: 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, 确定故障处理机. 系统用 1 个有向图(测试图)表示(见图 1), 其中, 顶点代表处理机, 边代表处理机之间的测试, 其结果称为故障症候. 诊断系统的任务就是从测试中判别出故障机, 找到故障机后通过处理, 对系统进行调整, 保证整个系统的安全与稳定. 随着对多处理机系统和网络系统可靠性要求的不断提高和系统规模的不断扩大, 设计出高效的诊断算法, 求得最优诊断是系统级故障诊断研究的核心问题^[2]. 因系统故障诊断作为系统维护工具, 其成本只能占系统总成本的小部分, 算法的时间复杂度越小, 则占用机器的开销就越小, 算法就越有实用价值, 尤其对大系统, 寻找时间复杂度小的算法更有意义. 为此, 作者提出了一种基于非齐次线性方程组的系统级故障诊断方法, 利用解方程组的形式找到所有的相容故障模式, 最后得出最优诊断, 相应地减少了系统级故障诊断的诊断复杂度, 可用于实际应用的网络诊断.

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, 这些假设称为测试模型. 以图论为工具, 把处理机作为结点, 系统之间的测试作为边, 并满足表 1 所示规则的模型, 称为 PMC 模型, 见图 1.

假设系统 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 若 x_i 是无故障单元, 则 $x_i = 0$; 若 x_i 是故障单元, 则 $x_i = 1$; $W_{ij} = 0$ 表示所测得的 x_i 和 x_j 单元是无故障单元; $W_{ij} = 1$ 表示所测得的 x_i 和 x_j 单元是故障单元.

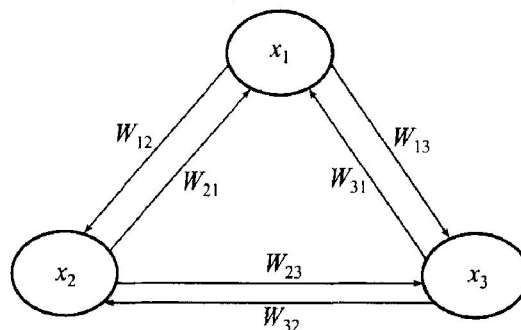


图 1 PMC 模型示意图

表 1 PMC 模型

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

定义 1^[1] 给定测试图 $G(V, E)$, 某故障集 F 称为 G 的相容故障模式 CFP, 当且仅当 F 的故障响应与 G 一致, 即当 $x_i \in V - F, x_j \in V - F$, 且 $W_{ij} \in E$, 则 $W_{ij} = 0$; 若 $x_i \in V - F, x_j \in F$ 且 $W_{ij} \in E$, 则 $W_{ij} = 1$.

一组处理机发生故障就导致某个症候出现, 由于故障的随机行为, 可能有多个症候与之相应. 若症

收稿日期: 2002- 11- 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60273070, 69973016)

作者简介: 罗立宇(1969-), 女, 湖南茶陵人, 株洲师范高等专科学校讲师, 湖南大学计算机与通信学院硕士研究生, 从事计算机网络及可信系统教学与研究.

候是指一组具体给定的测试结果的集合, 则称这组处理机的状态是这个症候的相容集.

定义 2^[1] 任何时候都为故障机集合的集合称为绝对故障机集, 其余故障集合为相对故障集合, 即只在某种假设下才为故障集合.

绝对故障机集与相对故障机集之并集为所有的相容故障模式(即 CFP).

定义 3^[1] 最优诊断是指给定系统中的任一症候 δ , 求与 δ 相容的故障集, 且此故障集在所有相容故障集中单元数最少.

由该定义知, 最优诊断是寻找最小相容故障集, 系统级故障诊断是寻找最小相容集.

2 非齐次线性方程组的提出

对于 PMC 模型, 对给定的症候, 可表示成一个非齐次线性方程组进行求解.

定义 4 假设系统 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 $x_i = 0, 1, i = 1, 2, \dots, n$. 对点 x_i, x_j , 令 x_k 为 0 或 1, 当测试边为 0 时, 可建立方程 $x_i - x_j - x_k = 0$ (x_i, x_j, x_k 均为 0 或 1); 当测试边为 1 时, 可建立方程 $x_i + x_j - x_k = 1$ (x_i, x_j, x_k 均为 0 或 1), 对每条测试边均建立 1 个方程, 则 n 条测试边用 n 个方程表示, 形成一个非齐次线性方程组.

从表 1 可知, 处理机与测试边均只能出现 0 和 1 共 2 种状态, 故可方便验证上述方程的正确性. 这里, 求全体相容故障模式的问题转化成求方程组的解集, 其结果即为最优诊断.

引理 1 从 n 个方程组成的非齐次线性方程组中, 可得 $x_1 + x_2 + \dots + x_n = a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n$ (x_i, k_i 均为 0 或 1, a_i 为常数, $i = 1, 2, \dots, n$), 令此表达式为 S , 求得当 S 为最小值时, k_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 取值即为最优诊断.

证明 S 取得最小值时, 系统 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中故障机数最少, 此时, (k_1, k_2, \dots, k_n) 为最小相容故障集, 即为系统的最优诊断.

例如, 假设 3 个点 x_1, x_2, x_3 有 3 条测试边: $W_{12} = 0, W_{23} = 0, W_{31} = 1$, 则:

$$\begin{cases} x_1 - x_2 - x_4 = 0 \\ x_2 - x_3 - x_5 = 0 \\ x_1 + x_3 - x_6 \end{cases}$$

即 $Ax = b$, 其中 x 均为 0 或 1, $x_4 \sim x_6$ 为对应边(添加的变量), 故:

a. 当系数矩阵与增广矩阵秩不同时, 方程组无

解, 即给定症候可能出错.

即秩 $A \neq \bar{A}$ (其中 \bar{A} 为 A 的秩) 时, 方程组无解.

b. 假设方程组有解, 解上述方程组可得

$$\begin{aligned} x &= (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)' \\ \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \end{bmatrix}^{-1} &= \\ k_1 \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 & -1/2 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} &+ \\ k_2 \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & -1/2 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} &+ \\ k_3 \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & -1/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} &+ \\ \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} &. \end{aligned}$$

其中: k_1, k_2 和 k_3 取值均为 0 或 1. 可见, 所有相容故障模式满足上述解空间. 对上述解空间, 令 k_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 均为 1, 可解得所有相容故障模式为 $(1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 1, 1)$.

3 个结点机构成的网络如表 2 所示.

表 2 3 结点机 PMC 模型的相容故障模式

W_{12}	W_{23}	W_{31}	故障模式
0	0	1	仅 x_1 为故障机
			仅 x_1, x_2 为故障机
			x_1, x_2, x_3 全为故障机

从表 2 可知, 最优故障模式为“仅 x_1 为故障机”, 此即为最小故障相容集, 所以最优诊断为 $(1, 0, 0)$.

c. 若只是求最优诊断, 则求式

$$\begin{aligned} S &= k_1(1/2 - 1/2 - 1/2) + k_2(1/2 + 1/2 - 1/2) + \\ &k_3(1/2 + 1/2 - 1/2) = \\ &- 1/2k_1 + 1/2k_2 + 2/3k_3 + 3/2 \end{aligned}$$

的最小值.

可见, 当 $k_1 = 1, k_2 = k_3 = 0$ 时, S 有最小值 1, 从而可得出最优诊断为 $(1, 0, 0)$.

在系统级故障诊断领域中, 共有 4 类测试模型^[2-5], 除 PMC 模型外, 还包括 BGM 模型, Chwa & Hakimi 模型以及 Maleks 模型. 系统级故障诊断中其他各类模型均为此 4 类模型的延伸.

给出测试症候, 类似于给出 PMC 模型, 可得出非齐次线性方程组. 解此方程组, 可得最优诊断.

3 相关诊断方法比较

方程诊断和布尔方程诊断是近几年提出的诊断算法^[5], 这 2 种诊断方法较复杂, 难以通过固定算法求解. 非齐次线性方程组把基于互测的 PMC 测试模型等价地转化为相应的方程组, 最终找到所有相容

故障模式, 得到最优诊断, 克服了以前的算法总是以满足 t -可诊断性为基础的缺点, 即使系统不满足 t -可诊断性, 也能较易地找到所有测试模型的相容故障模式, 从而减少了系统级故障诊断的复杂度, 具有结构清晰明了、简单实用的特点. 不足之处是方程组虽简单, 但无通用方程组.

4 结 语

基于非齐次线性方程组的系统级故障诊断方法的提出, 对实际应用的网络诊断具有指导作用. 如虚拟专用网、无线 ad-hoc 网络, 网点分散, 网络拓扑结构不断变化, 给基于图论的诊断带来一定的困难, 而基于非齐次线性方程组可以较容易地变换某些项而不必变换算法, 及时高效完成诊断.

参考文献:

- [1] Preparata F P, Metze G, Chien R T. On the Connection Assignment Problem of Diagnosable System[J]. IEEE Trans Electronic Computers, 1967, 16(12): 848-854.
- [2] Dahbura A T, Masson G M. An $O(n^2.5)$ fault identification algorithm for diagnosable system[J]. IEEE Trans Electronic Computers, 1984, 5: 486-492.
- [3] Chwa K Y, Hakimi S L. Scheme for fault-tolerant computing: A comparison of modularly redundant and t -diagnosable system[J]. Information Control, 1981, 49: 212-238.
- [4] XUAN Heng-nong, ZHANG Da-fang. The Research of the Equation Model on the System-level Diagnosis[R]. Proc of IEEE WRTLT, 2000: 148-157.
- [5] 刘 兵, 张大方. 基于布尔方程的系统级故障诊断表示及应用[J]. 计算机科学, 2003, 30(6): 410-413.

A method of the system-level fault diagnosis based on the non-idempotent linear equations

LUO Li-yu^{1,2}, ZHANG Da-fang², LIU Bing²

(1. Department of Mathematics and Computer Science, Zhuzhou Teachers' College, Zhuzhou 412007, China;
2. College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A non-idempotent linear equations diagnosis method is presented for test model of system-level fault diagnosis, it can turn the test model into a group of equivalence equations, and search all of consistent fault pattern by concise means, and the optimal diagnosis is presented. The method is more useful and effective than the graph method in test model representation, and it is more concise than equation model.

Key words: system-level fault diagnosis; test model; consistent fault pattern; optimal diagnosis