

系统级 BIT 的故障隔离策略

黎琼炜¹ 温熙森² 易晓山²

¹(航空仪器设备计量总站 北京 100070)

²(国防科技大学机电工程与自动化学院 长沙 410073)

(E-mail: Esther_drlee@sina.com)

摘要 为缩短系统级 BIT 的平均故障隔离时间, 吸取直接熵法的基本思想, 运用信息流模型和信息理论, 提出系统级故障隔离的间接熵法, 并讨论了工程中应用间接熵法时所需考虑的相关问题. 实验验证和理论分析表明, 该方法弥补了直接熵法构造故障隔离策略时需进行人工干预、计算复杂性高的不足; 在不等故障概率的假设条件下, 平均故障隔离时间比直接熵法减少约 38%.

关键词 系统级 BIT, 故障隔离策略, 信息, 熵

中图分类号 TB114.3

The Fault Isolation Strategy for System-Level BIT

LI Qiong-Wei¹ WEN Xi-Sen² YI Xiao-Shan²

¹(Aero-Equipment Test and Calibration Center, Beijing 100070)

²(Institute of Mechatronical Engineering & Automation, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

(E-mail: Esther_drlee@sina.com)

Abstract In order to shorten the mean fault isolation time (MFIT) of system-level BIT, an entropy-indirected algorithm for system-level fault isolation is developed based on the main idea of entropy-directed algorithm by using the information flow model and information theory. The related problems are also discussed in engineering application. The entropy-directed algorithm needs manual intervention to construct fault isolation strategy, and it is of a high computation complexity. Theoretical analysis and experimental results illustrate that the entropy-indirected algorithm remedies such deficiency. The MFIT of the strategy by this algorithm is about 38% less than that by the entropy-directed algorithm under the assumption of unequal fault rate.

Key words System-level BIT, fault isolation strategy, information, entropy

1 引言

当前, 随着武器装备系统日趋复杂, 系统级 BIT 逐渐成为提高武器装备系统维修性、测试性的重要手段^[1]. 由于平均故障隔离时间(MFIT)往往是使用系统级 BIT 进行维修时修复时间中最长、最难预测的那部分时间, 因此在系统级 BIT 中, 必须采用一定的故障隔离策略, 通

过合理安排各测试的执行顺序以隔离故障,并尽量缩短 MFIT^[2]. 而获得最优的诊断测试序列是一个 NP 完全问题,故寻找有效的故障隔离策略是长期以来人们普遍关心的问题^[3~5].

现有的故障隔离策略有直接法、二分法、指数法、直接熵法等,其中以信息流模型为基础的直接熵法平均故障隔离时间最短^[3]. 但直接熵法在选择测试时,计算复杂性为 $O(n^5)$ (n 为系统中测试与故障隔离结论数之和),故在工程中不适用于对复杂系统进行分析计算^[3]. 而在实际使用中,该算法构造的测试序列往往不能隔离所有故障,必须在序列中人为地添加测试,才能完成整个故障隔离过程,这样,不仅增加了维修的难度,也对维修人员提出了更高的技术要求.

本文在直接熵法的基础上开展了深入研究,提出了一种新的系统级 BIT 故障隔离策略——间接熵法,并就工程中应用该算法时所需考虑的相关问题及其有效性进行了分析和讨论.

2 基于信息流模型的故障隔离策略理论基础

2.1 基本假设

在一定的维修等级,使用系统级 BIT 对给定的系统进行故障隔离时,需要检测的故障和系统级 BIT 的测试集是一定的.

假设 1. 系统级 BIT 的测试集为 T , $\dim(T) = N$. 执行测试 t_i ($i=1, 2, \dots, N$) 所需的时间为 tm_i , 其结果只有“异常”和“正常”两种情况,分别用“1”和“0”表示. 每个测试都是“独立封装”的^[3], 即各测试均可独立完成,与执行顺序无关.

假设 2. 所有测试均为对称测试^[3], 此时, t_i ($i=1, 2, \dots, N$) 为“1”时系统可能发生的故障,即该测试为“0”时不可能发生的故障.

假设 3. 系统每次有且仅有一个故障隔离结论发生,系统的故障隔离结论集 F 为系统可能发生的所有故障加上“无故障”状态, $\dim(F) = M$. 某一故障隔离结论 f_j ($j=1, 2, \dots, M$) 发生时, $f_j = 1$; 反之, $f_j = 0$. 故障 f_k ($k=1, 2, \dots, M-1$) 发生的概率为 λ_k ,

“无故障”状态 f_M 出现的概率为 $\lambda_M = 1 - \sum_{k=1}^{M-1} \lambda_k$.

假设 4. 系统状态集为 ST , $ST = \{s_1, s_2, \dots, s_L\}$. 系统处于某种状态 s_k 的概率 P_{s_k} ($k=1, 2, \dots, L$).

基于上述假设,利用文献[3]的方法,可建立系统故障隔离结论集与系统级 BIT 中测试集间的信息流模型,获得故障隔离结论集/测试集的从属关系矩阵 $FT_{M \times N}$ 和测试集/测试集的从属关系矩阵 $TT_{N \times N}$. $FT_{M \times N}$ 和 $TT_{N \times N}$ 均为布尔矩阵,在 $FT_{M \times N}$ 中,若几个故障隔离结论对应的行向量相等,则说明现有的测试无法区分这些故障隔离结论,这些故障隔离结论的集合称为模糊故障隔离结论组;若按照排列顺序,某个故障隔离结论对应的行向量是首次出现的,与其前面的行向量均不相同,则该故障隔离结论是“独立”的,该行向量为“独立”行向量.

假设 5. $FT_{M \times N}$ 矩阵共有 K 个“独立”行向量 ($0 \leq K \leq M$), 模糊故障隔离结论组为 RU_u ($u=1, \dots, U$), $0 \leq U \leq 2/M$.

2.2 故障隔离策略的本质和问题描述

由上述基本假设,在单故障假设条件下,若将模糊故障隔离结论组 RU_u 用一个特殊的故障隔离结论代替,即当且仅当 RU_u 中某个结论发生时该故障发生,其概率等于 RU_u 中各

结论的概率之和, 则 $FT_{M \times N}$ 矩阵可以缩减为 $F'T_{K \times N}$. $F'T_{K \times N}$ 中所有的故障隔离结论都是“独立”的, 该矩阵的行向量就是 $FT_{M \times N}$ 矩阵的“独立”行向量. 这样, 系统状态与 $F'T_{K \times N}$ 中各故障隔离结论一一对应, 即系统状态 s_k 出现的概率 P_{s_k} ($k=1, 2, \dots, L$) 为 $F'T_{K \times N}$ 中相应的故障隔离结论的概率, 且 L 等于 K .

若 $F'T_{K \times N}$ 中测试 t_i 可以检测某些故障隔离结论, 则可根据该测试的值来判断系统是否可能处于这些故障隔离结论对应的状态. 在系统级 BIT 未执行任何测试之前, 系统状态未知, 可能处于任一状态. 随着测试数目的增加, 可逐渐缩小系统可能的状态集, 并最终确定系统状态. 因此可以认为, 系统级 BIT 的故障隔离过程就是通过一系列测试确定系统状态的过程; 在单故障假设条件下, 构造一个完整的故障隔离策略就是寻找一组测试序列, 以区分系统所有状态.

由于测试是二元的, 故这样的一组测试序列可构成一个二元正则的外向决策树, 其分枝点为测试, 树叶与系统的各状态一一对应. 令决策树从树根 v_0 至树叶 v_k ($k=1, 2, \dots, K$) 的路为 $PATH_k$, 而执行该路中所有分枝点对应的测试需花费 TM_k 时间, 树叶 v_k 对应的系统状态概率为 P_{s_k} , 那么该决策树的权为

$$\omega(Tree) = \sum_{k=1}^K (TM_k \cdot P_{s_k}) \quad (1)$$

显然, $\omega(Tree)$ 就是该决策树对应的故障隔离策略的平均故障隔离时间 (MFIT).

这样, 寻求最优故障隔离策略过程便可描述成一个根据 $F'T_{K \times N}$ 矩阵, 通过合理地选择测试及安排测试的顺序, 使决策树的权 $\omega(Tree)$ 最小的优化问题.

3 以间接熵为核心构造故障隔离策略

3.1 基本思想

由于获得最优故障隔离策略是 NP 完全问题, 故在工程中重要的是寻求一种快速算法, 以获得最接近上述最优化问题目标的解. 直接熵法是现有的故障隔离策略中 MFIT 最短的^[3]. 该方法认为故障隔离过程主要是一个不断降低系统不确定性的过程, 寻找使系统不确定性降低最多的测试是求解上述最优化问题的局部最优解. 在该法中, 把测试当作信息源, 用未知测试的数目来衡量系统的不确定性.

但是, 根据信息理论, 系统的不确定性实际上是由系统可能状态及其相应的概率所决定的^[6], 这种不确定性可表述为系统熵, 即

$$I = - \sum_{k=1}^{K'} P_{s_k} \log_2 P_{s_k} \quad (K' \leq K) \quad (2)$$

其中

$$\sum_{k=1}^{K'} P_{s_k} = 1 \quad (3)$$

因此, 基于式(2)和(3)来判断测试对系统不确定性的影响更为贴切, 而选择使系统熵降最大的未执行测试就是求解上述最优化问题的局部最优解.

我们将执行某个测试后造成的系统熵降命名为该测试的间接熵; 以间接熵为核心遍历决策树来构成故障隔离策略的方法称为间接熵法.

根据矩阵 $F'T_{K \times N}$ 中故障隔离结论集/测试集的从属关系, 可推理出执行某个测试后, 哪些故障隔离结论对应的系统状态可能, 哪些状态不再可能^[1], 这样便可计算出系统各可能

状态的概率,进而求得该测试的间接熵.

在间接熵法中,我们根据测试的不同结果,利用深度优先搜索法遍历决策树.整个决策树的形成过程是一个根据特定的测试选择方法不断推理、回溯的过程.回溯的条件是:所有测试值均已知,或系统可能状态集只包含一个状态.当满足如下任一条件时,整个过程终止.

- 1)已经回溯完决策树的树根;
- 2)所有系统状态均已被区分开.

3.2 间接熵的计算和测试选择

令 $\alpha (\alpha \geq 1)$ 为形成故障隔离决策树过程中执行测试的步骤, $ST(\alpha)$ 为执行第 α 步的测试前系统可能状态集.未执行任何测试时,系统状态未知,可能处于任一状态,系统可能状态集 $ST(1) = ST$, 系统处于各状态的概率等于 $F' T_{K \times N}$ 中对应的故障隔离结论概率.随着测试的进行,系统可能状态不断减少,即

$$ST(\alpha + 1) \subset ST(\alpha) \quad (4)$$

系统可能状态的概率也将发生变化.一旦系统状态确定,则该状态概率为 1.

设执行第 α 步的测试前系统的未知测试集为 T' , 且 $\dim(ST(\alpha)) \leq K$. 若此时执行 t_q ($t_q \in T'$), 且其值为“1”, 那么由故障隔离结论集/测试集的从属关系, 便可获得系统可能状态集 $ST_{q1}(\alpha + 1)$, 系统处于状态 $s (s \in ST_{q1}(\alpha + 1))$ 的概率为

$$P_s(\alpha + 1) = P(s | t_q = 1) = \frac{P_s(\alpha)}{\sum_{s \in ST_{q1}(\alpha + 1)} P_s(\alpha)} \quad (5)$$

式中 $P_s(\alpha)$ 为执行 t_q 前系统处于该状态概率.这样,便可利用式(2)计算此时的系统熵降.

由于同一测试的不同值对系统可能状态集的影响不尽相同,故造成的系统熵降也可能不同,而执行第 α 步测试前,测试 t_q 值是未知的, t_q 为“0”或“1”都是有可能的,故只有将 t_q 为不同值时导致的系统熵降综合在一起,才能准确地评价执行 t_q 后对系统不确定性的影响. t_q 的间接熵为

$$EN_q(\alpha) = P(t_q = 0) \Delta I_{q0}(\alpha, \alpha + 1) + P(t_q = 1) \Delta I_{q1}(\alpha, \alpha + 1) \quad (6)$$

式中 $\Delta I_{q1}(\alpha, \alpha + 1)$ 和 $\Delta I_{q0}(\alpha, \alpha + 1)$ 分别为第 α 步执行 t_q 后, $t_q = 1$ 和 $t_q = 0$ 时导致的系统熵降, $P(t_q = 1)$ 和 $P(t_q = 0)$ 分别为 $t_q = 1$ 和 $t_q = 0$ 的概率

$$\begin{cases} P(t_q = 1) = \left(\sum_{s \in ST_{i1}(\alpha + 1)} P_s(\alpha) \right) \\ P(t_q = 0) = \left(\sum_{s \in ST_{i0}(\alpha + 1)} P_s(\alpha) \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $ST_{q0}(\alpha + 1)$ 为 $t_q = 0$ 时系统可能状态集.

若 T' 中测试 t_* 的间接熵满足

$$EN_*(\alpha) = \max\{EN_q(\alpha) | t_q \in T'\} \quad (8)$$

则说明在 T' 中执行该测试对缩短系统不确定性的作用最大.那么,第 α 步执行测试 t_* .若在 T' 中有多个测试满足式(8),则选择其中检测故障隔离结论最多的.

4 相关问题讨论

4.1 等故障概率条件下的间接熵法

在工程中进行系统级 BIT 设计时,往往事先很难获知系统各故障隔离结论概率的具体

数值, 故在构造故障隔离策略时, 只能假设各故障隔离结论出现概率相等, 即相应的系统状态等概率. 此时, 式(6)可改为^[1]

$$EN_q(\alpha) = \min(\Delta X_{q_1}, \Delta X_{q_0}) \quad (9)$$

其中 $\Delta X_{q_1} = \dim(ST(\alpha)) - \dim(ST_{q_1}(\alpha+1))$, $\Delta X_{q_0} = \dim(ST(\alpha)) - \dim(ST_{q_0}(\alpha+1))$

4.2 间接熵法的计算复杂性

显然, 间接熵法的主要计算量在于构成决策树时选择测试的过程. 而由图论可知, 若系统状态数为 K , 则构成决策树需进行 $K-1$ 步测试选择^[1].

在等故障概率的条件下, 以乘法运算作为基本运算, 间接熵法中每步选择测试的计算复杂性为 $O(NK \log_2 K)$, 构造整个故障隔离决策树的计算复杂性为 $O(NK^2 \log_2 K)$. 而直接熵法仅每步选择测试的计算复杂性便已达到 $O(n^5)$ (n 为测试与系统故障隔离结论的总数)^[3]. 因此, 当故障概率相等时, 间接熵法比直接熵法更适合于工程中为复杂系统构造故障隔离策略.

在不等故障概率的条件下, 以乘法运算作为基本运算, 间接熵法中每步选择测试的计算复杂性为 $O(NK)$, 构造整个故障隔离决策树的计算复杂性为 $O(NK^2)$. 该算法适于工程应用.

4.3 在工作环境中的系统级 BIT 诊断

从前面的论述可以看出, 由于间接熵是建立在信息流模型基础上的, 在形成故障隔离决策树的过程中, 无需对实际系统的物理模型和具体测试进行描述, 所以它可用于系统各个维修级别的故障诊断. 但因系统的不同工作环境和维修级别对故障隔离的要求不同, 故在工程中使用间接熵法时需根据实际情况作相应的调整.

(1) 测试顺序

在系统级 BIT 中, 测试的执行顺序往往是有规定的, 如必须首先检测系统的输入信号是否在安全范围之内等^[2]. 因此, 在使用间接熵法进行故障隔离时, 必须首先遵循有关测试顺序的规定; 再根据已执行的测试及其结果, 利用间接熵法, 在对顺序没有要求的未知测试集中选择测试.

(2) 隔离到现场可更换单元(LRU)

系统级 BIT 主要用于外场级维修^{1,2]}, 只需将故障隔离至 LRU. 因此, 故障隔离的终止条件应改为: 系统可能状态集中只包含属于同一 LRU 的故障隔离结论集所对应的系统状态. 决策树的回溯和终止条件也作相应的改动, 并在计算间接熵时, 将 $F'T_{K \times N}$ 中同一 LRU 的故障隔离结论所对应的行向量相“或”为一个行向量^[1].

(3) 证实系统可用性

在系统运行时或系统任务准备过程中, 往往要求系统级 BIT 首先判断系统的可用性^[2]. 此时, 可将 $F'T_{K \times N}$ 中所有非“0”行向量相“或”为一个行向量, 其对应故障隔离结论的概率为所有非“0”行向量对应的故障隔离结论概率之和; 同样, 对 $F'T_{K \times N}$ 中所有“0”行向量也作同样处理. 这样, 再利用间接熵法, 系统级 BIT 便可快速且可靠地证实系统是否可用.

5 间接熵法的有效性验证

为了验证间接熵法的有效性, 本文采用多个算例, 对直接熵法和间接熵法进行了比较.

在等故障概率的假设条件下, 采用文献[3]所示系统, 两种方法的结果相同, 但直接熵法必需进行预处理或人工干预, 否则不能完成决策树的构造; 而间接熵法则可完全实现决策树

的自动构造。

在不等故障概率的假设条件下,针对 20 个系统,分别用直接熵法和间接熵法来构造故障隔离策略(各系统的具体参数见文献[1]之附录 C)。计算表明,当故障概率不相等时,用间接熵法构造的故障隔离策略的平均故障隔离时间比直接熵法平均缩短了 38.76%。

6 结论

为缩短系统级 BIT 的平均故障隔离时间,本文吸取了直接熵法的基本思想,运用信息流模型和信息理论,提出了系统级故障隔离的间接熵法。间接熵法不仅可用于系统各个维修级别、不同工作环境的故障诊断,还克服了直接熵法构造故障隔离策略时需要进行人工干预的缺陷;并且在等故障概率假设条件下,寻找每一步测试的计算复杂性仅为 $O(NK\log_2 K)$, 低于直接熵法,更适合于在工程中构造复杂系统的故障隔离决策树。在不等故障概率假设条件下,间接熵法寻找每一步测试的计算复杂性为 $O(NK)$,其平均故障隔离时间比直接熵法缩短了约 38%。因此,在工程中应用间接熵法,不仅对维修人员技术水平的要求较低,而且还可有效地缩短维修时间。

References

- 1 Li Qiong-Wei. Research on design for testability technology for system-level built-in test and it's application in the integrated navigation system[Ph. D. Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001(in Chinese)
- 2 Zeng Tian-Xiang. Design for Testability and Diagnosis Technology for Electronic Equipment. Beijing: Aviation Industry Press, 1996(in Chinese)
- 3 William R Simpson, John W Sheppard. System Test and Diagnosis. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1994
- 4 Garey M. Optimal binary identification procedures. *Journal of Applied Mathematics*, 1972, **23**(2):173~186
- 5 Pattipati K R, Alexandridis M G. Application of heuristic search and information theory to sequential fault diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, **20**(4):872~887
- 6 Wang Bing. Entropy and Information. Xi'an: Northwest Industry University, 1994(in Chinese)

黎琼炜 2001 年在国防科技大学机电工程与自动化学院获博士学位,现工作单位为航空仪器设备计量总站。主要研究领域为航空测试与状态监控技术。

(LI Qiong-Wei Received her Ph. D. degree from Institute of Mechatronical Engineering & Automation, National University of Defence Technology in 2001, and currently works in Aero-equipment Test and Calibration Center. Her research interests include aviation test and condition-monitoring technology.)

温熙森 国防科学技术大学校长,教授,博士生导师。主要研究领域为机器状态监控与故障诊断、可靠性共性技术等。

(WEN Xi-Seng He is a professor and president of National University of Defence Technology. His research interests include condition-monitoring and fault diagnosis technology, reliability and maintainability technology.)

易晓山 博士,毕业于国防科学技术大学,现为该校副教授。主要研究领域为智能 BIT 和故障诊断技术。

(YI Xiao-Shan Received his Ph. D. degree from National University of Defence Technology, and now he is an associate professor at the university. His research interests include intelligent BIT and fault diagnosis technology.)