

测试的离散信道模型与信息量

万明, 张凤鸣, 樊晓光
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:针对系统级故障诊断过程中测试信息量的计算问题,建立了测试过程的离散信道模型,提出了基于信道平均交互信息量的测试信息计算方法,并证明算法的复杂性为 $O(mn \log_2^n)$,为系统级故障诊断提供了精确的定量分析基础。

关键词:测试;信息;离散信道模型;故障诊断

中图分类号: TN70 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)04-0068-03

在系统级故障诊断问题中,故障诊断策略是系统测试性设计的重要内容。在确定被测系统的功能和结构,并进行了初步的固有测试性设计之后,选择哪些测试以及采用何种测试序列是故障诊断策略设计的关键问题。有效的故障隔离策略必须合理安排各测试的执行顺序以隔离故障,并尽量缩短平均故障隔离时间。已经证明,获得最优测试序列是一个 NP 完全问题,寻找有效的故障隔离策略是长期以来普遍关心的问题。

现有的故障隔离策略有直接法、二分法、指数法、直接熵法、间接熵法等,其中以信息流模型为基础的直接熵法和间接熵法平均故障隔离费用近似最小。但间接熵法的计算复杂性为 $O(mn^2 \log_2 n)$ (m 和 n 分别为可用测试数和故障状态数)^[1],而直接熵法的计算复杂性更高达 $O(n^5)$ (n 为系统中测试与故障隔离结论数之和)^[2-4],故在工程中不适于复杂系统进行分析计算。

1 测试的离散信道模型与信息量

在系统级故障诊断中,故障隔离过程表示为故障候选集的诊断测试序列。初始情况下,故障候选集为所有可能故障与无故障状态集合。对候选集可选的测试包括若干项,其中测试与故障之间的关系可用相关性矩阵表示^[4],矩阵中 1 为可检测,0 表示不可检测。诊断测试序列中的每一步表示为:分别计算各测试信息量,选择信息量最大(或单位费用信息量最大)者为当前测试,再根据测试结果缩小故障候选集。诊断测试序列的终止条件为所有测试信息量均为 0,即测试集不能为故障隔离提供有用信息。在诊断测试序列的计算中,测试信息量的计算是关键问题,因此有必要讨论测试的信息过程,以进一步简化测试信息的计算方法。

1.1 测试的离散信道模型

故障诊断的目的在于定位系统可能存在的故障,即候选集 $C = \{F_j | j = 1, 2, \dots, n\}$ 中何种故障状态发生。当前的可选测试集 $T = \{T_i | i = 1, 2, \dots, m\}$,而 T_i 的测试结果可能正确(记为 $T_{i,0}$),也可能错误(记为 $T_{i,1}$),其结果都将包含有关系统状态的信息。因此根据信息理论,故障诊断的一般过程可理解为图 1 所示的离散信道模型。

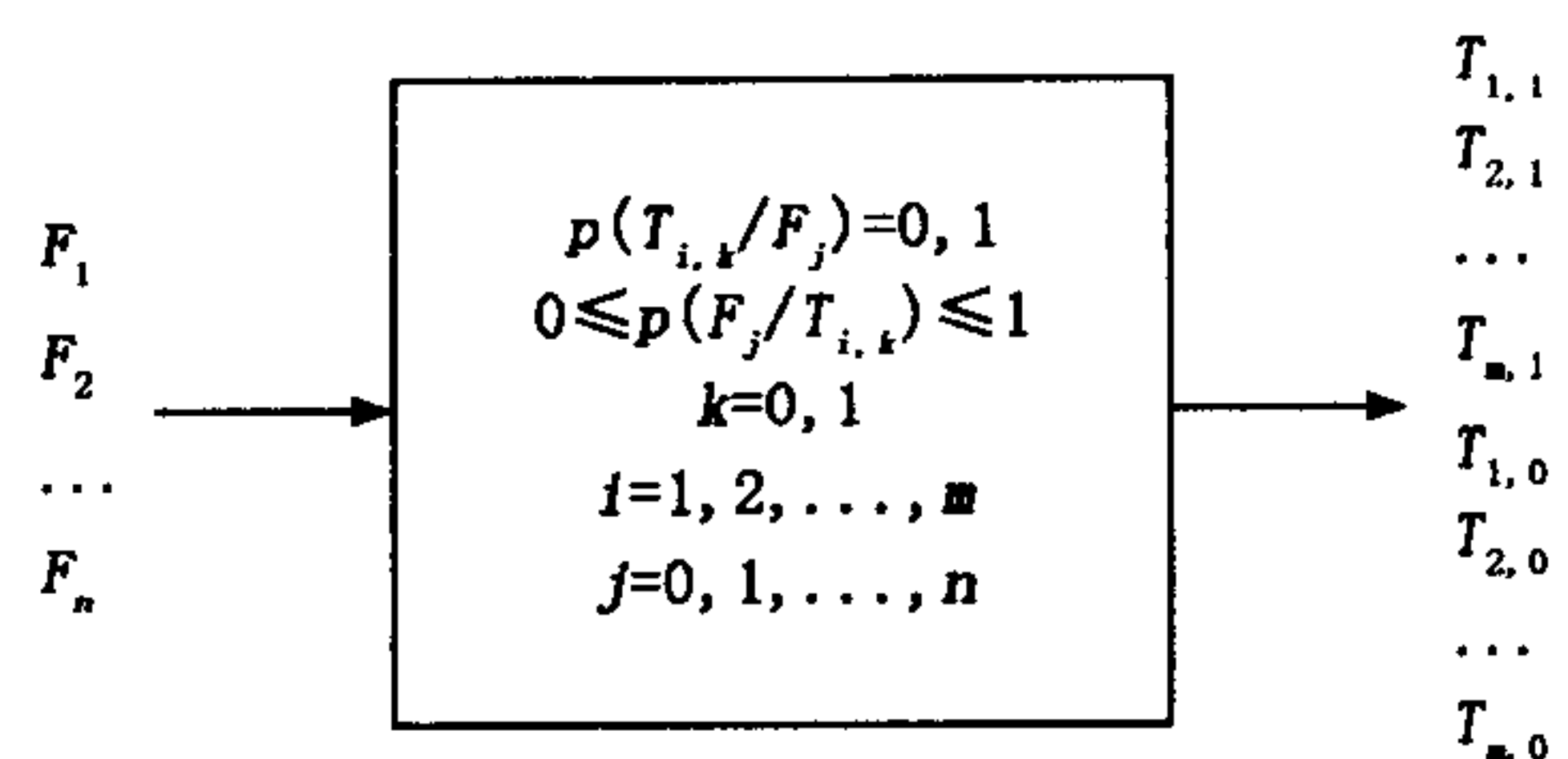


图1 故障隔离的信道模型

图1 中信道的输入为符号“ F_j ” ($j = 1, 2, \dots, n$),信道输出为“ $T_{i,0}$ ”和“ $T_{i,1}$ ” ($i = 1, 2, \dots, m$),而信息传输

收稿日期:2005-11-16

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:万明(1979-),男,江西南昌人,博士,主要从事航空电子系统故障诊断研究;
张凤鸣(1963-),男,重庆梁平人,教授,博士生导师,主要从事系统工程研究。

过程对应于测试序列中的一步。测试 T_i 与输入符号集(即候选集)之间的平均交互信息量即反映了 T_i 关于候选集的信息,也反映了测试 T_i 的故障隔离能力。信息量越大,系统被测试结果划分得就越精致,系统故障状态的不确定性就越小,因此在故障隔离过程中,应始终选择信息量最大的测试进行故障隔离。

1.2 测试的信息量

首先对候选集 C 中故障 F_j 的概率做归一化处理,表示为

$$P_c(F_j) = p(F_j) / \sum_{F_i \in C} p(F_i) \tag{1}$$

根据测试的集散信道模型,从测试 T_i 的结果中获取的关于候选集 C 的信息量可以用 T_i 与 C 之间的交互信息量 $I(C; T_i)$ 来计算:

$$I(C; T_i) = \sum_{F_j \in C} \sum_{k=0}^1 P_c(F_j T_{i,k}) I(F_j; T_{i,k}) \tag{2}$$

其中

$$P_c(F_j T_{i,k}) = P_c(F_j T_{i,k}) P_c(T_{i,k}) \tag{3}$$

$$I(F_j; T_{i,k}) = \log_2 \frac{P_c(F_j T_{i,k})}{P_c(F_j)} \tag{4}$$

对于候选集 C 的相关性矩阵,显然有

$$P_c(T_{i,k}) = \begin{cases} \sum_{F_j \in C \cap D_i} P_c(F_j), & k = 1 \\ \sum_{F_j \in C - D_i} P_c(F_j), & k = 0 \end{cases} \tag{5}$$

其中 D_i 表示与测试 T_i 相关的故障集合。故障 F_j 关于 $T_{i,k}$ 的条件概率

$$P_c(F_j/T_{i,k}) = \begin{cases} \frac{D_{ij} P_c(F_j)}{P_c(T_{i,1})}, & k = 1 \\ \frac{(1 - D_{ij}) P_c(F_j)}{P_c(T_{i,0})}, & k = 0 \end{cases} \tag{6}$$

其中 D_{ij} 表示相关性矩阵中测试 T_i 与故障 F_j 之间的相关性。综合公式(2) - (6) 可得

$$I(C; T_i) = -P_c(T_{i,1}) \log_2 P_c(T_{i,1}) - (1 - P_c(T_{i,1})) \log_2 (1 - P_c(T_{i,1})) \tag{7}$$

其中 $p_c(T_{i,1})$ 为在故障候选集 C 中进行测试 T_i ,其结果为1的先验概率。

1.3 计算复杂性分析

考虑到系统各种可能的状态,完整的诊断测试序列组合为一个二叉诊断树。诊断树的叶结点为单一故障或模糊故障组,其余结点为测试,由测试可能出现的两种结果(0或1),构成二叉分支。由图论知识可知,若系统可分故障数为 n ,则构成的诊断树需进行 $n - 1$ 步测试。在平均的意义下,树的深度为 $\log_2 n$ 。深度为 l 的测试结点有 2^l 个,每个测试结点中的故障候选集有 $n/2^l$ 个故障,可选的测试有 $m - l$ 个,则每个测试节点中选择测试的计算复杂性为 $(m - l)n/2^l$ 。对于实际系统,一般情况下有 $m \approx n \gg l$,则整个诊断树的复杂性

$$O\left(\sum_{l=0}^{\log_2 n} (2^l (n - l) n / 2^l)\right) \approx O(mn \log_2 n) \tag{8}$$

其中 m 和 n 分别为初始相关性模型中的可用测试数和故障状态数。可见根据离散信道模型计算测试信息量的方法,其计算量远小于直接信息熵的计算量 $O(n^5)$ 和间接信息熵的计算量 $O(mn^2 \log_2 n)$ 。

2 应用实例

某分布式网络控制系统^[3]的拓扑结构及其相关性矩阵分别见图2、图3。

图2中 MONITOR 为诊断处理器,通过发送消息(QXX)诊断网络中的故障。表1相关性矩阵中行为测试,列为待分故障状态,其中故障可能在网络中任意结点或链路上发生,FO 表示系统的正常状态。矩阵中的1表示相关,例如诊断消息 QMG₁ 经过总线 SB 到达

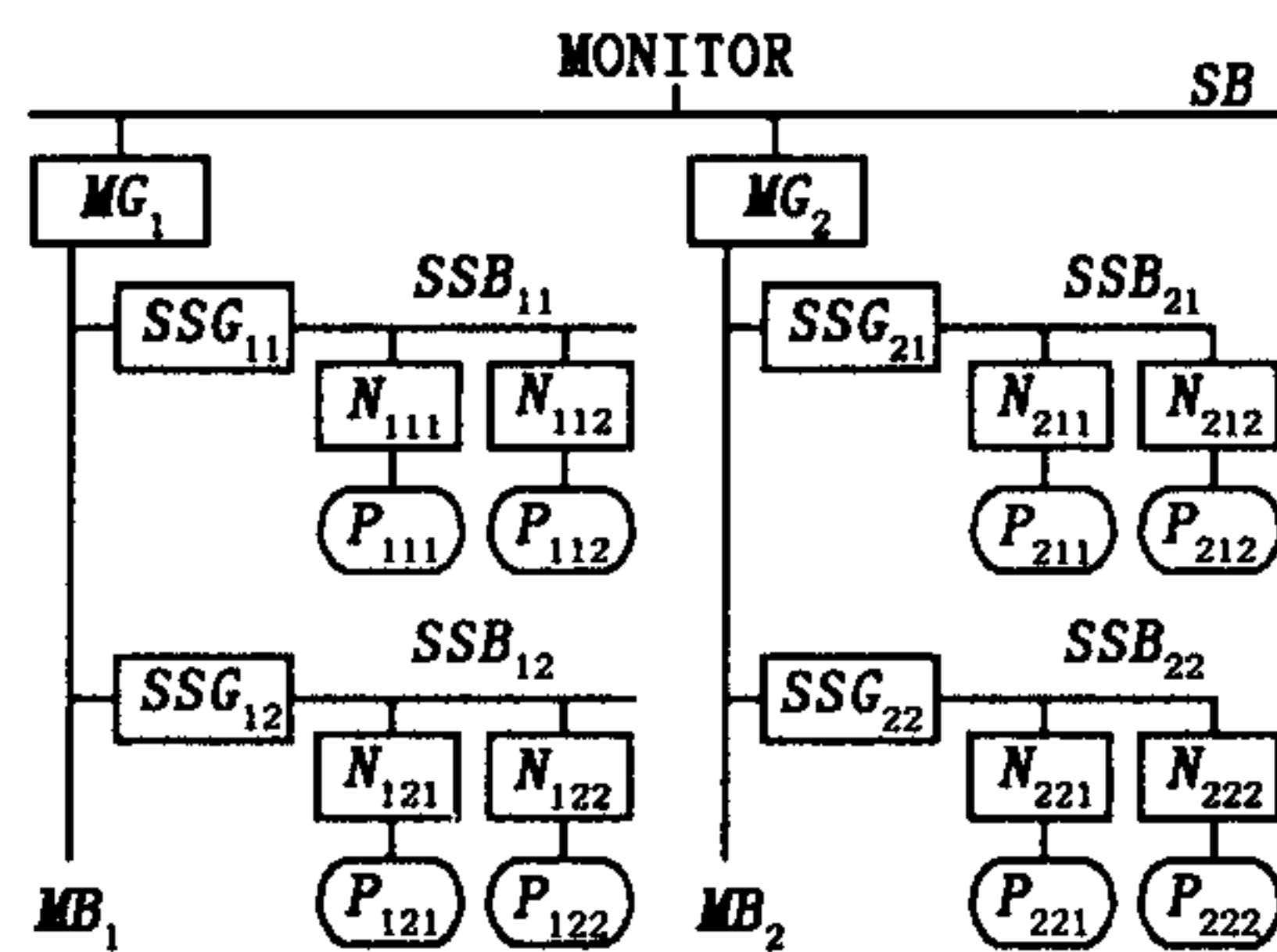


图2 网络系统实例

MG_1 , 因此 QMG_1 相关的故障集为 $\{SB, MG_1\}$ 。设网络正常的概率为 0.99, 其它各故障的发生概率相同, 均为 3.45×10^{-4} , 各测试的费用均为 1, 则此时测试按照公式(7)的准则选取测试, 生成的诊断树见图 4。诊断树的计算结果与文献[3]完全相同, 但计算量明显减少, 同时根据离散信道模型构造诊断树的方法, 其计算结果与直接熵法和间接熵法构造的诊断树同样具有近似最小的平均故障隔离费用。

	F	SB	MG ₁	MB ₁	SSG ₁₁	SSB ₁₁	N ₁₁₁	P ₁₁₁	N ₁₁₂	P ₁₁₂	SSG ₁₂	SSB ₁₂	N ₁₂₁	P ₁₂₁	N ₁₂₂	P ₁₂₂	MG ₂	MB ₂	SSG ₂₁	SSB ₂₁	N ₂₁₁	P ₂₁₁	N ₂₁₂	P ₂₁₂	SSG ₂₂	SSB ₂₂	N ₂₂₁	P ₂₂₁	N ₂₂₂	P ₂₂₂		
QMG ₁	1	1																														
QSSG ₁₁		1	1	1	1																											
QN ₁₁₁		1	1	1	1	1	1																									
QP ₁₁₁		1	1	1	1	1	1	1																								
QN ₁₁₂		1	1	1	1	1	1		1																							
QP ₁₁₂		1	1	1	1	1	1		1	1																						
QSSG ₁₂		1	1	1	1	1	1				1																					
QN ₁₂₁		1	1	1	1	1	1				1	1	1																			
QP ₁₂₁		1	1	1	1	1	1				1	1	1	1																		
QN ₁₂₂		1	1	1	1	1	1				1	1	1																			
QP ₁₂₂		1	1	1	1	1	1				1	1	1																			
QMG ₂		1															1															
QSSG ₂₁		1															1	1	1													
QN ₂₁₁		1															1	1	1	1	1											
QP ₂₁₁		1															1	1	1	1	1	1										
QN ₂₁₂		1															1	1	1	1	1		1									
QP ₂₁₂		1															1	1	1	1	1		1	1								
QSSG ₂₂		1															1								1							
QN ₂₂₁		1															1								1	1	1					
QP ₂₂₁		1															1								1	1	1	1				
QN ₂₂₂		1															1								1	1	1					
QP ₂₂₂		1															1								1	1	1					

图 3 实例的相关性模型

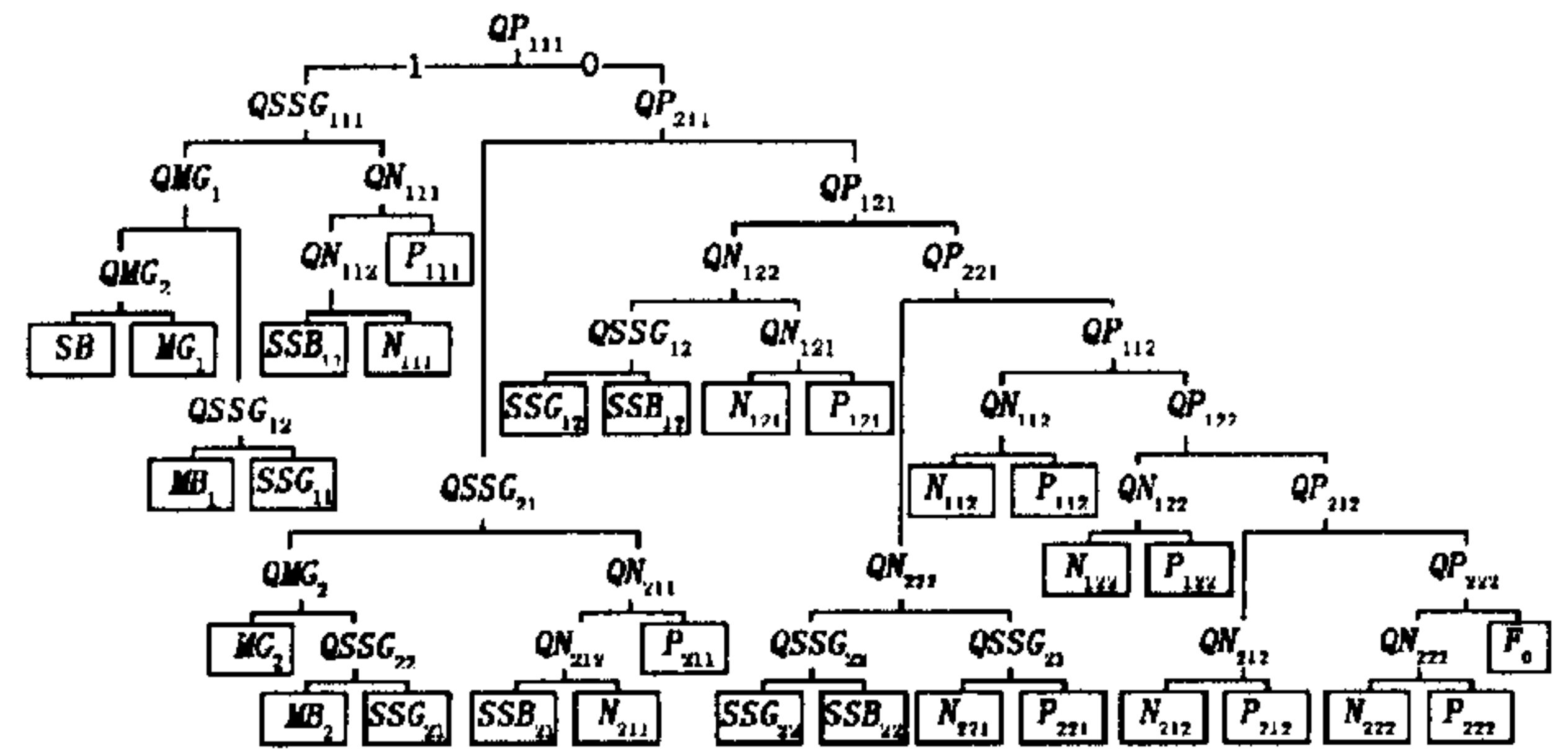


图 4 实例的诊断树

3 结论

测试的信道模型为系统级故障诊断过程提供了精确的定量分析基础, 在保证诊断树构造结果近似最优的基础上, 其测试信息量的计算方法远小于直接信息熵和间接信息熵的计算方法, 更有利于测试信息理论在工程实际中的应用。可以证明, 在故障概率不等、测试费用不等的情况下, 本文提出的测试信息量计算方法同样具有计算量最小的结论。

参考文献:

[1] 黎琼炜, 温熙森, 易晓山. 系统级 BIT 的故障隔离策略[J]. 自动化学报, 2004, 30(1): 137 - 142.
 [2] Simpson W R, Sheppard J W. System Test and Diagnosis[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1994.
 [3] Agre J R. A Message - based Fault Diagnosis Procedure[J]. Journal of the ACM, 1986, 6(2): 328 - 337.
 [4] 田 仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
 [5] 姜 丹. 信息论与编码[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004.

(编辑: 姚树峰)

Discrete Channel Model and Information Gain of Test

WAN Ming, ZHANG Feng - ming, FAN Xiao - guang

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In system - level fault diagnosis, the computation of test's information gain directly affects the efficiency of diagnosis strategy. After the building of the channel model of test, the computation method of test's information gain based on mean mutual information is presented. The complexity of the method is $O(mn \log_2 2)$. The channel model and its information gain computation method build a precise foundation for quantitative analysis of system - level fault diagnosis.

Key words: information; discrete channel model; fault diagnosis