

# 基于概率阈的冗余多故障诊断策略

黄以锋<sup>1</sup>, 景 博<sup>1</sup>, 喻 彪<sup>2</sup>, 李健君<sup>1</sup>

(1.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;2.61267 部队,北京,101114)

**摘要** 针对冗余复杂系统的多故障诊断问题,为减小计算量和期望测试费用,设定一个概率值作为概率阈,忽略发生概率低于这个值的多故障状态,提出了一种基于概率阈的冗余多故障诊断策略。该策略首先对相关矩阵模型进行转化,并舍弃概率低于概率阈故障状态,然后用 Rollout 算法对基于信息熵的诊断策略进行优化,并给出了计算步骤与方法。实例表明,与文献中方法相比该策略虽然降低了一定的准确度,但减少了更大比例的期望测试费,而且降低了相关性矩阵模型的规模,缩短了计算时间。

**关键词** 冗余系统;多故障诊断;诊断策略;Rollout 算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.001

**中图分类号** TP206 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0001-05

## Multiple Fault Diagnosis Strategy for Redundant System Based on Probability Threshold

HUANG Yi-feng<sup>1</sup>, JING Bo<sup>1</sup>, YU Biao<sup>2</sup>, LI Jian-jun<sup>1</sup>

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit of 61267, Beijing 101114, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of the multiple fault diagnosis of redundant system, a multiple fault diagnosis strategy for redundant system based on probability is proposed to reduce the computation and the expectant costs under condition that a probability value is set as a probability threshold and the multi-fault state whose probability is lower than the value of this probability threshold is neglected. First, this strategy is used to optimize the relation matrix model, and give up the multi-fault states whose probability is lower than the probability threshold. And then, Rollout algorithm is used to optimize the information entropy based diagnosis strategy. The example demonstrates that though the expectant costs are lowered by the strategy into a certain accuracy, a great proportion of the expectant test costs is reduced, the size of the fault-test relation matrix model is minimized, and the calculation time is reduced.

**Key words:** redundant system ; multiple fault diagnosis; diagnostic strategy; Rollout algorithm

序贯诊断策略要解决的问题是如何设计一组测试序列,以尽量少的期望测试费用来达到故障隔离的要求<sup>[1]</sup>。Pattipati 等已证明单故障假设的序贯诊

断策略是 NP 完全问题<sup>[2]</sup>。而对于拥有众多组成部件的复杂系统,往往出现同一时刻存在多个故障的情况。这种情况更为复杂,由于隐藏故障与掩盖故

收稿日期:2014-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51201182)

作者简介:黄以锋(1982-),男,湖南耒阳人,讲师,博士,主要从事可测试性设计、故障诊断研究。E-mail:huangyiff@126.com

**引用格式:**黄以锋,景博,喻彪,等. 基于概率阈的冗余多故障诊断策略[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):1-5. HUANG Yifeng, JING Bo, YU Biao, et al. Multiple fault diagnosis strategy for redundant system based on probability threshold.[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 1-5.

障<sup>[3]</sup>的存在,原有的单故障诊断策略已不再适用。很多国内外学者已经开始关注多故障序贯诊断策略问题,并且提出了多种近似算法用来求取优化测试序列<sup>[3-7]</sup>。

在复杂系统的重要的关键部件中一般会采用冗余设计,以提高可靠性。在冗余系统中,只有冗余模块全部发生故障,才会导致整个系统工作异常,这类故障被称为最小故障<sup>[8]</sup>。冗余系统可以当成一种特殊的多故障系统,由于最小故障的存在,使得非冗余系统的相关性模型和诊断策略不能直接应用于冗余系统。冗余系统的多故障诊断问题的计算更为复杂,现有的研究成果相对较少<sup>[8-10]</sup>。

在复杂的多故障系统中,部分故障状态发生概率极小,可以当成小概率事件对待,认为这些故障状态不会发生。基于以上考虑,在设计诊断策略时,设定一个概率值作为概率阈,若某个多故障状态发生的概率低于这个值,则认为该故障状态是不会发生,在诊断策略的过程中不予考虑,从而降低期望测试费用,减小算法的计算量和计算时间。

基于上述思路,本文提出了一种基于概率阈的多故障系统诊断策略。

## 1 问题描述

冗余多故障诊断测试模型可用五元组 $(S, P, T, C, B)$ 表示,其中:

1)  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m, \dots, s_z\}$  为系统的独立故障状态集,其中  $s_{m+1} \sim s_z$  表示最小故障。为了便于描述,本文定义  $S = S \cup \{s_0\} = \{s_0, s_1, \dots, s_z\}$  为包括正常状态的故障状态集,其中  $s_0$  为正常状态,符号  $\cup$  表示并集运算;

2)  $P = [p(s_1), p(s_2), \dots, p(s_m)]^T$  是系统各故障状态的先验概率矢量;

3)  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  是  $n$  个可用测试的集合,每一个子项可用来测试故障状态的某个子集,本文假设测试的结果是绝对可靠的;

4)  $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]^T$  是综合时间、人力要求、设备要求等的测试费用矢量,各个测试费用与测试是相对应的;

5)  $B = [b_{ij}]$  是  $m \times n$  的故障-测试相关二进制矩阵,它表示系统的故障状态集  $S$  和测试集  $T$  之间的关系,如  $t_j$  能检测到  $s_i$ , 则  $b_{ij} = 1$ ; 否则  $b_{ij} = 0$ 。

冗余多故障诊断问题可表述为设计可隔离多故障状态的诊断策略,并且要求期望测试费用尽量低。期望测试费用  $J$  的计算公式为:

$$J = \sum_{S_I \subseteq S} p(S_I) E(C | S_I) = \sum_{S_I \subseteq S} \sum_{S_I \subseteq S_I \in R_I} p(S_I) c_j \quad (1)$$

式中:  $E(\cdot)$  为期望值;  $E(C | S_I)$  为假设多故障状态  $S_I$  发生时,隔离需要的所有费用;  $S_I \subseteq S$ , 为最终隔离的多故障状态,即诊断树的叶子节点中包含的多故障状态;  $p(S_I)$  为多故障状态的发生概率;  $R_I$  为用于隔离该故障状态所用到的测试的集合。

$S_I$  可用一个  $m$  维的向量  $\mathbf{X}$  表示:  $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_m]^T$ , 若  $s_i \in S_I$ , 则  $x_i = 1$ , 否则  $x_i = 0$ 。  $S_I$  发生的概率可表示为:

$$p(S_I) = \prod_{i=1}^m p(s_i)^{x_i} (1 - p(s_i))^{1-x_i} \quad (2)$$

需要说明的是,诊断树的一个叶子节点中可能会包含多个多故障状态,其经历过相同的测试,可以先计算叶子节点的期望测试费用,再求和得到整个诊断树的期望测试费用  $J$ , 所以式(1)又可表示为:

$$J = \sum_{A_k \subseteq A} \left( \sum_{S_I \subseteq A_k} p(S_I) \sum_{t_j \in R_I} c_j \right) \quad (3)$$

式中:  $A$  为所有叶子节点的集合;  $A_k$  为该叶子节点包含多故障状态的集合。

## 2 多故障诊断策略

### 2.1 建立多故障相关性矩阵模型

将原来的单故障相关性矩阵模型通过扩展、简化,删除概率低于系统故障概率阈的故障状态等操作,转换成新的多故障相关性矩阵模型。以第1节的模型为例,其详细计算步骤如下:

1) 将故障状态集  $S$  进行扩展,扩展后的多故障状态集为  $S' = \{s'_0, s'_1, \dots, s'_{2^m-1}\}$ ,  $S'$  中任意多故障状态  $s'_i$  可用  $m$  维的向量  $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_m]^T$  表示,其中,若  $s_j \in s'_i$ , 则  $x_j = 1$ , 否则  $x_j = 0$ , 并且满足:

$$\sum_{j=1}^m 2^{j-1} x_j = i \quad (4)$$

将多故障状态  $s'_i$  包含的单故障状态所对应二进制行向量进行相或计算,得到  $s'_i$  的故障-测试相关二进制行向量。 $s'_i$  的条件概率计算为:

$$p(s'_i) = \prod_{j=1}^m p(s_j)^{x_j} (1 - p(s_j))^{1-x_j} \quad (5)$$

2) 将多故障状态  $S'$  扩展为  $S'' = \{s''_0, s''_1, \dots, s''_{2^m-1}\}$ , 其中  $S''$  中的任意多故障状态  $s''_z$  可用一个  $z$  维的向量  $\mathbf{X}' = [x_1, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_z]^T$  表示,其中,  $x_1 \sim x_m$  的取值和  $s'_i$  一致,对于  $x_{m+1} \sim x_z$ , 若  $m+1 \leq j \leq z$ , 则  $s_j$  是最小故障,包括多个冗余故障状态,若这些冗余故障状态都被  $s'_i$  包含,则  $x_j = 1$ , 否则  $x_j = 0$ 。

多故障状态  $s''_z$  的故障-测试相关二进制行向量

由  $s'_i$  和它所包含的最小故障对应的二进制行向量相或得到。多故障状态  $s''_i$  的概率和  $s'_i$  相同。

3) 假设系统的故障概率阈为  $p_i$ , 删除多故障状态集  $S''$  中所有概率低于  $p_i$  的故障状态, 剩余的多故障状态组成新的故障状态集  $S'''_1$ 。

4) 合并故障状态集  $S'''_1$  中故障-测试相关二进制行向量相同的多故障状态, 用  $s''_k$  表示合并后的多故障状态, 其中  $k$  为合并的多故障状态中序号最小的多故障状态的序号。  $s''_k$  的概率为合并的所有多故障概率之和。用  $S''$  表示合并后的多故障状态集。

**2.2 用 Rollout 算法计算出测试序列**

Rollout 算法是建立在另一种启发式算法基础上的一种一步前向回溯算法<sup>[11-13]</sup>。该算法不是一种最优算法, 但能保证其计算效果不比基础启发式算法差。本文在信息熵算法的基础上建立 Rollout 算法, 对新的多故障相关性矩阵模型进行计算, 得到测试序列。详细计算步骤和文献[14]中算法建立的第二部分一样, 此处不再赘述。

**3 实例分析与比较**

通过一个实例来展示本文算法的具体计算过程, 并将计算结果与文献[10]进行比较。

实例 1 的多信号流模型见文献[10]中图 2, 其相关性矩阵见表 1 所示, 故障状态集为  $S = \{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$ , 包括一个正常状态  $s_0, s_1 \sim s_5$  和最小故障  $s_6$ , 测试集为  $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ 。5 个

独立的故障状态  $s_1 \sim s_5$  的先验概率矢量为  $\mathbf{P} = [0.014, 0.027, 0.125, 0.068, 0.146]^T$ , 与测试相对应的测试费用矢量为  $\mathbf{C} = [1, 1, 1, 1, 1]^T$ 。首先, 将故障状态集  $S$  扩展为多故障状态集  $S'$ , 并用式(5)计算扩展后各故障状态的条件概率, 得到第 1 次扩展后的多故障相关性矩阵模型。

表 1 实例 1 的相关性矩阵

Tab.1 The dependency matrix of exam 1

故障状态	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	概率
	1	1	1	1	1	
$s_0$	0	0	0	0	0	—
$s_1$	0	1	0	0	1	0.014
$s_2$	0	0	1	1	0	0.027
$s_3$	1	0	0	1	1	0.125
$s_4$	1	1	0	0	0	0.068
$s_5$	1	1	1	1	0	0.146
$s_6 = \{s_1, s_3\}$	1	1	1	1	1	—

接着, 将多故障状态集  $S'$  扩展为多故障状态集  $S''$ , 并用  $\mathbf{X}' = [x_1, \dots, x_6]^T$  表示各个扩展后的多故障状态, 得到第二次扩展后的多故障相关性矩阵模型, 见表 2。系统的故障概率阈  $p_i$  为 0.001, 将  $S''$  中所有概率低于  $p_i$  的多故障状态删除掉, 剩余的多故障状态组成新的故障状态集  $S'''_1$ , 见表 3。

对表 3 中故障特征信息一致的多故障状态进行合并, 合并后的多故障相关性矩阵模型见表 4。

表 2 第 2 次扩展后的多故障相关性矩阵模型

Tab.2 The multiple fault dependency matrix after the second extention

多故障状态	$\mathbf{X}'$ 的取值	包含的单故障状态	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	条件概率
			1	1	1	1	1	
$s''_0$	$[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$	$s_0$	0	0	0	0	0	0.668 1
$s''_1$	$[1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$	$s_1$	0	1	0	0	1	0.009 5
$s''_2$	$[0, 1, 0, 0, 0, 0]^T$	$s_2$	0	0	1	1	0	0.018 5
$s''_3$	$[1, 1, 0, 0, 0, 0]^T$	$s_1 s_2$	0	1	1	1	1	0.000 3
$s''_4$	$[0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$	$s_3$	1	0	0	1	1	0.095 4
$s''_5$	$[1, 0, 1, 0, 0, 1]^T$	$s_1 s_3 s_6$	1	1	1	1	1	0.001 4
$s''_6$	$[0, 1, 1, 0, 0, 0]^T$	$s_2 s_3$	1	0	1	1	1	0.002 6
$s''_7$	$[1, 1, 1, 0, 0, 1]^T$	$s_1 s_2 s_3 s_6$	1	1	1	1	1	0.000 0
$s''_8$	$[0, 0, 0, 1, 0, 0]^T$	$s_4$	1	1	0	0	0	0.048 7
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$s'''_{31}, s'_7$	$[1, 1, 1, 1, 1, 1]^T$	$s_1 s_2 s_3 s_4 s_5 s_6$	1	1	1	1	1	0.000 0

表 3 删除处理后的多故障相关性矩阵模型

Tab.3 The multiple fault dependency matrix after delete operation

多故障状态	包含的故障状态	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	条件概率
		1	1	1	1	1	
$s_0$	$s_0$	0	0	0	0	0	0.668 1
$s_1$	$s_1$	0	1	0	0	1	0.009 5
$s_2$	$s_2$	0	0	1	1	0	0.018 5
$s_4$	$s_3$	1	0	0	1	1	0.095 4
$s_5$	$s_1 s_3 s_6$	1	1	1	1	1	0.001 4
$s_6$	$s_2 s_3$	1	0	1	1	1	0.002 6
$s_8$	$s_4$	1	1	0	0	0	0.048 7
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$s_{28}$	$s_3 s_4 s_5$	1	1	1	1	1	0.001 2

表 4 合并后的多故障相关性矩阵模型

Tab.4 The multiple fault dependency matrix after merge operation

多故障状态	被合并的多故障状态	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	条件概率
		1	1	1	1	1	
$s_0$	$s_0$	0	0	0	0	0	0.668 1
$s_1$	$s_1$	0	1	0	0	1	0.009 5
$s_2$	$s_2$	0	0	1	1	0	0.018 5
$s_4$	$s_4$	1	0	0	1	1	0.095 4
$s_5$	$s_5 s_{17} s_{20} s_{28}$	1	1	1	1	1	0.020 5
$s_6$	$s_6$	1	0	1	1	1	0.002 6
$s_8$	$s_8$	1	1	0	0	0	0.048 7
$s_{10}$	$s_{10} s_{16} s_{18} s_{24}$	1	1	1	1	0	0.127 1
$s_{12}$	$s_{12}$	1	1	0	1	1	0.007 0

然后,用 Rollout 算法对表 4 中的相关性矩阵模型进行计算,得出优化测试序列,并建立故障诊断树,见图 1。用式(3)可求出概率阈  $p_t = 0.000 1$  时期望测试费用为 2.362 2 准确度为 99.76%,若不使

用概率阈即  $p_t$  为 0,用同样的方法可得出期望测试费用为 2.399 9 准确度为 100%。文献[10]也建立了实例 1 故障诊断树,用式(3)可求出期望测试费用为 2.784 5,准确度也为 100%。

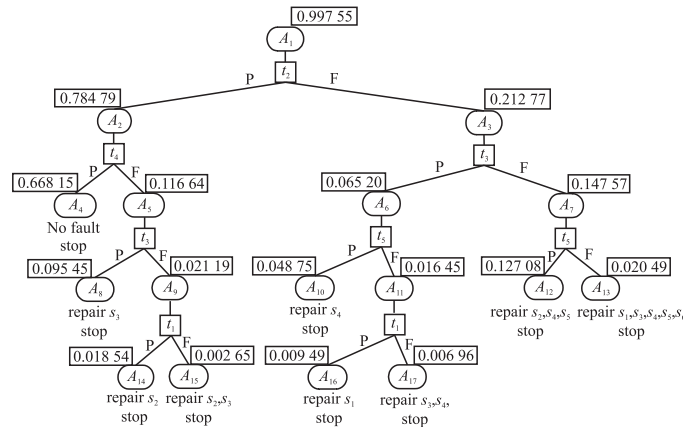


图 1 实例 1 的故障诊断树

Fig.1 The fault diagnosis tree of exam 1

本文算法得到的期望测试费用低于文献[10],在设置了  $p_t$  为 0.001 后,忽略了概率低于 0.001 的多故障状态,和不设置概率相比,尽管准确度降低了

0.24%,但是期望测试费用降了 1.53%。而且由于忽略了部分故障状态,减少了多故障相关性矩阵模型的规模,计算复杂度和计算时间也相应减少。

## 4 结语

和非冗余多故障系统的诊断策略相比,冗余多故障系统的诊断策略更为复杂。考虑到部分故障状态发生的概率极低,为提高计算效率,本文提出了一种基于概率阈的冗余多故障诊断策略,该策略虽然损失了一定的准确度,但却使期望测试费有了更大比例的下降,并减小了相关性矩阵模型的规模,缩短了计算时间。在实际工程应用中,应根据具体的系统来确定概率阈的取值,若对计算速度要求较高,且漏诊代价不是很大,则概率阈的取值应稍大一些。

### 参考文献(References):

- [1] 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,2003:171-213.  
TIAN Zhong, SHI Junyou. System testability design, analysis and verification[M]. Beijing: Beijing university of aeronautic and astronautics press, 2003: 171-213. (in Chinese)
- [2] Pattipati K R, Alexandridis M G. Approach of heuristic search and information theory to sequential fault diagnosis [J]. IEEE trans on systems, man, and cybernetics, 1990, 20(4): 872-887.
- [3] Raghavan V, Shakeri M, Pattipati K R, et al. Sequential testing algorithms for multiple fault diagnosis [J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics- part a: systems and humans, 2000, 30(1): 1-14.
- [4] 王红霞,潘红兵,叶晓慧.多故障的测试序列问题研究[J].兵工学报,2011,32(12):1518-1523.  
WANG Hongxia, PAN Hongbing, YE Xiaohui. Research on test sequence problem for multiple fault diagnosis [J]. Acta armamentarii, 2011, 32(12): 1518-1523. (in Chinese)
- [5] 王子玲,许爱强.基于最小碰集的多故障诊断算法研究[J].兵工学报,2010,31(3):337-342.  
WANG Ziling, XU Aiqiang. Multiple fault diagnosis algorithms based on minimal hitting sets[J]. Acta armamentarii, 2010, 31(3): 337-342. (in Chinese)
- [6] 杨鹏,邱静,刘冠军.多故障诊断策略优化生成技术研究[J].兵工学报,2008,29(11):1379-1383.  
YANG Peng, QIU Jing, LIU Guanjun. Research on optimization generation technology for multiple fault diagnostic strategy [J]. Acta armamentarii, 2008, 29(11): 1379-1383. (in Chinese)
- [7] Gao Lei, Zeng Guang-zhou. Dynamic testing algorithm based on rough sets for multiple fault diagnosis [C]//Fifth international conference on fuzzy systems and knowledge discovery. [S.l.]: IEEE press, 2008: 157-163.
- [8] Shakeri M, Pattipati K R, Raghavan V, et al. Multiple fault isolation in redundant systems [R]. NCC2-5123, NASA final report, 1997.
- [9] Yang Peng, Qiu Jing, Liu Guanjun, et al. Multiple fault diagnostic strategy for redundant system [C]//Annual conference of the prognostics and health management society. [S.l.]: PHM press, 2011: 1-7.
- [10] Yang Shuming, Yang Peng, Qiu Jing, et al. Multiple fault diagnostic strategy in systems with redundancy [C]//IEEE circuits and systems international conference on testing and diagnosis. [S.l.]: IEEE press, 2009: 1-4.
- [11] Bertsekas D P, Tsitsiklis J N, Wu C. Rollout algorithms for combinatorial optimization [J]. Heuristics, 1997, 3(3): 245-262.
- [12] Tu F, Pattipati K R. Rollout strategy for sequential fault diagnosis [J]. IEEE trans on systems, man and cybernetics, 2003, 33(1): 86-99.
- [13] 黄以锋,景博.基于Rollout算法的多值属性系统诊断策略[J].控制与决策,2011,26(8):1269-1272.  
HUANG Yifeng, JING Bo. Diagnosis strategy for multi-value attribute system based on rollout algorithm [J]. Control and decision, 2011, 26(8): 1269-1272. (in Chinese)
- [14] 朱海鹏,景博,黄以锋,等.基于概率阈的非冗余多故障系统诊断策略优化[J].计算机应用研究,2012,29(12):4512-4514.  
ZHU Haipeng, JING Bo, HUANG Yifeng, et al. Optimization of diagnostic strategy in non-redundant multi-fault system based on probability threshold [J]. Application research of computers, 2012, 29(12): 4512-4514. (in Chinese)

(编辑:徐敏)