基于概率阈的非冗余多故障系统诊断策略优化*

朱海鹏[1], 景　博[1], 黄以锋[1], 苏俊阳[2]
(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 甘肃省科学院, 兰州 730000)

摘　要: 针对传统的单故障假设无法诊断复杂系统多故障并发的情况,提出了一种基于概率阈的非冗余系统多故障诊断策略。首先对系统的相关性模型进行扩展,并删除低于概率阈的故障状态,建立非冗余系统的多故障测试诊断模型;其次在信息熵算法的基础上建立 Rollout 算法,获得了最优测试序列;然后建立故障诊断树并计算测试代价;最后以某机载电子系统为例验证了该方法的有效性。该方法可以在保证测试费用最小的情况下获得非冗余系统的最优测试序列。

关键词: 诊断策略; 多故障诊断; 概率阈
中图分类号: TP306　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1001-3695(2012)12-4512-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.028

Optimization of diagnostic strategy in non-redundant multi-fault system based on probability threshold

ZHU Hai-peng[1], JING Bo[1], HUANG Yi-feng[1], SHU Jun-yang[2]
(1. *College of Aeronautics & Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an* 710038, *China*; 2. *Gansu Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: This paper propsoed a multiple fault diagnostic strategy for non-redundant system based on probability threshold. Firstly, it expanded system dependency models, removed fault states which were below probability threshold, and established multiple fault diagnostic models of non-redundant system. Then using entropy algorithm as base algorithm, it presented Rollout algorithm to obtain best test sequence. At last, it built the fault diagnosis tree and calculated test cost. It put forward an air-borne electronic system to prove its effectiveness. It can obtain the best test sequence by minimums cost test.

Key words: diagnostic strategy; multiple fault diagnosis; probability threshold

在故障诊断中,一般假设同一时刻只出现一个故障,在此假设下所设计的诊断策略不能正确地诊断多故障。而实际中对于拥有很多元器件的复杂系统或者在运行过程中具备很少甚至不具备维修机会的系统(如先进战斗机、太空站等),发生多故障的几率非常大,因此研究多故障情形下的诊断策略优化设计技术就显得尤为重要。

Shakeri 等人[1]最早对此开展了研究,他们认为隐含故障(hidden failure)和掩盖故障(masking failure)是造成系统故障的主要原因,从而针对这两种故障类型提出将传统的诊断策略设计方法进行扩展,即当隔离出疑似故障单元之后,采取维修或更换措施将其排除,然后将已执行的测试再重复一遍,以确认系统是否还有故障存在。这种扩展的诊断策略设计方法存在以下问题:a)由该方法所设计出的诊断策略在诊断多故障时,虽然可以有效防止漏诊,但是仍会发生误诊;b)每次只能隔离出一个故障,诊断效率比较低。Shakeri 对单故障隔离策略予以扩展,提出了基于确定策略(sure strategies)的多故障诊断策略近优生成算法;Tu 等人[2]提出了基于有向图模型的故障诊断方法,并考虑测试不可靠问题对故障隔离的影响。近年来,国内学者也开展了大量有关多故障诊断方法的研究。杨鹏等人[3]提出了一种基于布尔逻辑的多故障诊断推理机,提出了多故障情况下的诊断策略优化设计方法,有效避免了漏诊和误诊的发生。龙兵和方甲永等人也在多故障诊断问题上做了相应的研究[4~9]。

本文将原有相关性矩阵模型扩展为新的多故障相关性矩阵模型,通过设定概率阈对模型进行简化,结合信息熵和 Rollout算法,得到了优化的测试序列。一个 m 种故障状态的多故障系统具有 2^m 种多故障状态。首先,列举所有多故障状态作为单故障系统的故障状态,并计算新故障状态的概率,新故障状态的故障特征信息为合并的各个多故障状态的并集;然后,合并具有相同特征信息的新故障状态,形成了多故障系统对应的单故障系统模型。这样就可以用单故障系统的诊断策略进行分析。从表面上看,采用上述方法相当于将一个 m 种故障状态的系统变为 2^m 种故障状态的系统,计算量将急剧增大。实际上,由于可用测试的数量没有变化,数量是有限的,这使得测试提供的信息量往往不足以区分所有的故障模型,一些多故障状态将被合并为一个故障状态,从而减少了故障状态的数量,降低了相关性模型的复杂程度,进一步减少了计算量。

1　概率阈的概念

概率阈是指设定的一个概率值,若某个多故障状态发生的概率低于这个值,则认为该故障状态几乎是不可能发生的,在诊断策略的过程中不予考虑。概率阈的取值应该是根据具体

收稿日期: 2012-06-10; **修回日期:** 2012-07-18　**基金项目:** 航空科学基金资助项目(20101996012)

作者简介: 朱海鹏(1989-),男,河南平舆人,硕士研究生,主要研究方向为故障诊断、测试性设计(zzhhpp@126.com);景博(1965-),女,河北邯郸人,教授,博导,主要研究方向为故障预测与健康管理、测试性设计;黄以锋(1982-),男,湖南耒阳人,讲师,博士,主要研究方向为测试性设计.

的系统来确定的,若要求计算速度快,期望测试费用小,而且漏诊的代价低,则可以将概率阈设定得大一些;否则,概率阈则应该设定得小一些。本文提出的基于概率阈的非冗余多故障系统诊断策略就是通过降低较小的测试精度来减小计算量和测试期望代价。

在复杂多故障系统中,一些多故障状态的发生概率可能是非常小的。在统计学中,习惯上将发生概率 $P\leqslant 0.05$ 或 $P\leqslant 0.01$ 的事件称为小概率事件。一般来说,在一次实验中小概率事件不会发生。在构建多故障系统诊断策略时,分析小概率事件,认为概率过小的多故障状态不会发生,不予考虑,从而达到减少计算量和期望测试费用的目的。

2 算法建立

整个计算过程分为三个部分。第一部分,将原来的相关性矩阵模型扩展为多故障相关性矩阵模型,然后根据设定的概率阈删除掉概率低于概率阈的多故障状态,最后再进行合并等操作;第二部分,在信息熵算法[7]的基础上建立 Rollout 算法,计算得到的测试序列;第三部分,建立故障诊断树,并计算测试费用。

由于第三部分比较简单,下面只分别给出第一、二部分的详细计算步骤。第一部分步骤如下:

a)假设要测试的系统故障状态集为 $S=\{s_0,s_1,\cdots,s_m\}$,包括一个正常状态和 m 个独立的故障状态;测试集为 $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$,包括 n 个可用测试;系统各故障状态的先验概率矢量为 $\boldsymbol{P}=[p(s_1),p(s_2),\cdots,p(s_m)]^{\mathrm{T}}$;与测试相对应的测试费用矢量为 $\boldsymbol{C}=[c_1,c_2,\cdots,c_n]^{\mathrm{T}}$;故障—测试相关二进制矩阵为 $\boldsymbol{B}=[b_{ij}]$。

b)将单故障状态集 S 扩展为多故障状态集 $S'=\{s'_0,s'_1,\cdots,s'_{2m-1}\}$,$S'$ 中的任意多故障状态 s_i' 可用一个 m 维的向量 $\boldsymbol{X}=[x_1,\cdots,x_m]'$ 表示,其中,若 $s_j\in s_i'$,则 $x_j=1$,否则 $x_j=0$,并且满足:

$$\sum_{j=1}^{m}2^{j-1}x_j=i \tag{1}$$

多故障状态 s'_i 的故障—测试相关二进制行向量(故障特征信息)由它所包含的单故障状态对应的二进制行向量相或得到。

多故障状态 s_i' 的概率则用式(2)进行计算:

$$p(s'_i)=\prod_{j=1}^{m}p(s_j)^{x_j}(1-p(s_j))^{1-x_j} \tag{2}$$

c)设定系统的故障概率阈为 p_t,将多故障状态集 S' 中所有概率低于 p_t 的多故障状态删除,剩余的多故障状态组成新的故障状态集 S'_1。

d)将故障状态集 S'_1 中故障—测试相关二进制行向量(故障特征信息)相同的多故障状态进行合并,合并后的多故障状态用 s_k'' 表示,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的概率之和;合并后的多故障状态集用 S'' 表示。

第二部分的详细计算步骤如下:

a)对故障状态集 x 和测试集 t 进行初始化,x 初始化后为合并处理后的多故障状态 F,t 初始化为可用测试集 T。

b)用测试集 t 中的每个测试 t_q 将故障状态集 x 划分为通过和不通过两个子集 $\{x_{q0},x_{q1}\}$。

(a)计算各子集的概率:

$$p(x_{qv})=\sum_{f_i\in x_{qv}}p(f_i)\quad v=0,1 \tag{3}$$

(b)对每个子集,首先更新其故障状态的概率:

$$p(f_i)'=\frac{p(f_i)}{\sum\limits_{f_i\in x_{qv}}p(f_i)}\quad v=0,1 \tag{4}$$

然后,用信息熵算法获得子集的优化测试序列:

①设要测系统的状态集 $x'=x_{qv}$,测试集 t 为子集 x_{qv} 的可用测试集;

②对状态集 x' 的可选测试集 t 中的每个测试 t_j,计算测试通过和失败的概率 $p(x'_{j0})$ 和 $p(x'_{j1})$:

$$p(x_{jv}')=\sum_{f_i\in x'_{jv}}p(f_i)\quad v=0,1 \tag{5}$$

③计算可选测试集 t 中的每个测试 t_j 提供的信息量:

$$I(x,t_j)=-\{p(x_{j0})\log_2p(x_{j0})+p(x_{j1})\log_2p(x_{j1})\} \tag{6}$$

④从可选测试集 t 中选择一个测试 t_b,使信息量和测试费用的比值最大;

⑤将 t_b 放入最优测试序列,从测试集 t 中删除 t_b;

⑥用测试 t_b 将状态集 x' 划分为通过和失败子集,对各测试子集,重复②~⑥,直到诊断树完全建立。

⑦用式(7)计算该测试序列的期望测试费用 $h(x_{qv})$:

$$h(x_{qv})=\sum_{i=1}^{m_v}\{\sum_{j=1}^{|p_i|}c_{p_i[j]}\}p(f_i)\quad v=0,1 \tag{7}$$

其中:m_v 为子集 x_{qv} 中故障状态的个数,p_i 表示用于隔离故障状态 f_i 的测试序列;$|p_i|$ 表示测试序列 p_i 的容量。

(c)计算 t_q 的期望测试费用:

$$h_{t_q}=c_q+h(x_{q1})p(x_{q1})+h(x_{q0})p(x_{q0}) \tag{8}$$

(d)比较测试集 t 中的每个测试的期望测试费用,选择具有最低期望测试费用的 t_a:

$$t_a=\arg\min_{t_q\in t}h_{t_q} \tag{9}$$

c)用测试 t_a 将状态集 x 划分为两个子集,分别为 x_{a0} 和 x_{a1},更新两子集中故障状态的概率为

$$p(f_i)'=\frac{p(f_i)}{\sum\limits_{f_i\in x_{av}}p(f_i)}\quad v=0,1 \tag{10}$$

d)重新取 x 为各测试子集,t 为原测试集删除测试点 t_a 后的测试点集合,重复步骤 b)~d),直到测试子集中元素的个数不多于一个。

这样,被选择的测试点就组成了优化的测试序列。

3 实例分析

下面取故障概率阈 p_t 为 0.001,以文献[1]中的实例 1 模型为例(文献[7~9]都针对该模型进行过多故障诊断策略优化的研究),展示本文算法对非冗余系统的计算过程。

实例 1 为一非冗余多故障系统,相关性矩阵如表 1 所示,其中包括六个故障状态和五个可用测试。首先进行第一部分的计算,得到的多故障状态集 S' 如表 2 所示。系统的故障概率阈 p_t 为 0.001,将多故障状态集 S' 中所有概率低于 p_t 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',如表 3 所示。

表 1 实例 1 的相关性矩阵模型

故障状态	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	概率	条件概率
	1	1	1	1	1		
s_0	0	0	0	0	0	—	0.700
s_1	0	1	0	0	1	0.014	0.010
s_2	0	0	1	1	0	0.027	0.020
s_3	1	0	0	1	1	0.125	0.100
s_4	1	1	0	0	0	0.068	0.050
s_5	1	1	1	1	0	0.146	0.120

表 2 扩展后的多故障相关性矩阵模型

多故障状态	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'	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_3'	s_1s_2	0	1	1	1	1	0.000 3
s_4'	s_3	1	0	0	1	1	0.095 4
s_5'	s_1s_3	1	1	0	1	1	0.001 4
s_6'	s_2s_3	1	0	1	1	1	0.002 6
s_7'	$s_1s_2s_3$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_8'	s_4	1	1	0	0	0	0.048 7
s_9'	s_1s_4	1	1	0	0	1	0.000 7
s_{10}'	s_2s_4	1	1	1	1	0	0.001 4
s_{11}'	$s_1s_2s_4$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_{12}'	s_3s_4	1	1	0	1	1	0.007 0
s_{13}'	$s_1s_3s_4$	1	1	0	1	1	0.000 1
s_{14}'	$s_2s_3s_4$	1	1	1	1	1	0.000 2
s_{15}'	$s_1s_2s_3s_4$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_{16}'	s_5	1	1	1	1	0	0.114 2
s_{17}'	s_1s_5	1	1	1	1	1	0.001 6
s_{18}'	s_2s_5	1	1	1	1	0	0.003 2
s_{19}'	$s_1s_2s_5$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_{20}'	s_3s_5	1	1	1	1	1	0.016 3
s_{21}'	$s_1s_3s_5$	1	1	1	1	1	0.000 2
s_{22}'	$s_2s_3s_5$	1	1	1	1	1	0.000 5
s_{23}'	$s_1s_2s_3s_5$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_{24}'	s_4s_5	1	1	1	1	0	0.008 3
s_{25}'	$s_1s_4s_5$	1	1	1	1	1	0.000 1
s_{26}'	$s_2s_4s_5$	1	1	1	1	0	0.000 2
s_{27}'	$s_1s_2s_4s_5$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_{28}'	$s_3s_4s_5$	1	1	1	1	1	0.001 2
s_{29}'	$s_1s_3s_4s_5$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_{30}'	$s_2s_3s_4s_5$	1	1	1	1	1	0.000 0
s_{31}'	$s_1s_2s_3s_4s_5$	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

多故障状态	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'	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_1s_3	1	1	0	1	1	0.001 4
s_6'	s_2s_3	1	0	1	1	1	0.002 6
s_8'	s_4	1	1	0	0	0	0.048 7
s_{10}'	s_2s_4	1	1	1	1	0	0.001 4
s_{12}'	s_3s_4	1	1	0	1	1	0.007 0
s_{16}'	s_5	1	1	1	1	0	0.114 2
s_{17}'	s_1s_5	1	1	1	1	1	0.001 6
s_{18}'	s_2s_5	1	1	1	1	0	0.003 2
s_{20}'	s_3s_5	1	1	1	1	1	0.016 3
s_{24}'	s_4s_5	1	1	1	1	0	0.008 3
s_{28}'	$s_3s_4s_5$	1	1	1	1	1	0.001 2

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如表 4 所示。

表 4 合并后的多故障相关性矩阵模型

多故障状态	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	0.668 1
s_1''	—	0	1	0	0	1	0.009 5
s_2''	—	0	0	1	1	0	0.018 5
s_4''	—	1	0	0	1	1	0.095 4
s_5''	$s_5's_{12}'$	1	1	0	1	1	0.008 3
s_6''	—	1	0	1	1	1	0.002 6
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_{17}''	$s_{17}'s_{20}'s_{28}'$	1	1	1	1	1	0.019 1

然后按照计算过程的第二部分和第三部分，计算出优化测试序列，建立故障诊断树，如图 1 所示。

期望测试费用为

$$J=P(A_4)\times 2+P(A_8)\times 3+P(A_{10})\times 3+P(A_{12})\times 3+P(A_{13})\times 3+P(A_{14})\times 4+P(A_{15})\times 4+P(A_{16})\times 4+P(A_{17})\times 4=2.3635$$

本文算法设置了概率阈，删除了概率低于概率阈的多故障状态。与未设置概率阈($p_t=0$)的算法相比，尽管准确度降低了 0.24%，但是期望测试费用降得更多，达到了 1.57%，如表 5 所示。

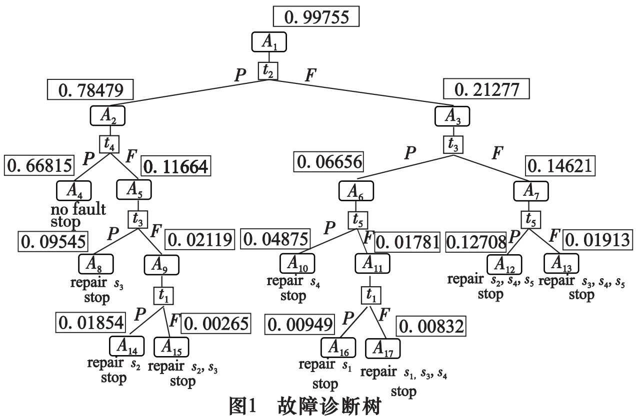

图1 故障诊断树

表 5 概率阈算法对比分析表

概率阈算法	准确度/%	期望测试费用
$p_t=0$	100	2.401
$p_t=0.001$	99.76	2.364

表 6 将本文算法得到的故障诊断树和现有的研究结果进行比较，可以看出，本文算法的期望测试费用是最小的，而且本文算法是采用先测试、最后修复的原则，更便于操作。

表 6 本文算法与已有算法结果对比分析表

算法来源	期望测试费用	算法来源	期望测试费用
Sure1 算法[1]	2.715	文献[8]	2.783
Sure2 算法[1]	2.616	文献[9]	2.54
Sure3 算法[1]	2.535	概率阈($p_t=0.001$)	2.364
文献[7]	2.783		

4 结束语

本文针对多故障测试模型进行研究，在忽略小概率事件的基础上，提出了一种基于概率阈的非冗余多故障系统诊断策略，概率阈的取值依系统测试要求而定。实例分析表明，本算法虽然会使准确度有所下降，但是降低了多故障相关性矩阵模型的规模，缩短了计算时间，并减少了更大比例的期望测试费用。与已有算法结果的比较可以看出，基于概率阈算法的期望测试费用是最低的。本文的方法只是针对非冗余多故障系统，对于冗余多故障系统的诊断策略优化将是本文进一步的研究工作。

参考文献：

[1] SHAKERI M, RAGHAVAN V, PATTIPATI K R, *et al*. Sequential testing algorithms for multiple fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 2000, 30(1): 1-14.

[2] TU Fang, PATTIPTTI K, DEB S. Computationally efficient algorithms for multiple fault diagnosis in large graph-based systems[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 2003, 33(1): 73-85.

[3] 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.

[4] 龙兵，姜兴渭，宋政吉. 基于多信号模型航天器多故障诊断技术研究[J]. 宇航学报，2004，25(5)：591-594.

[5] 方甲永，肖明清，王学奇，等. 测试不可靠条件下多故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报，2011，37(4)：433-438.

[6] 连可，龙兵，王厚军. 基于贝叶斯最大后验概率准则的大型复杂系统故障诊断方法研究[J]. 兵工学报，2008，29(3)：352-356.

[7] STARZYK J A, LIU Dong, LIU Zhi-hong, *et al*. Entropy-based optimum test points selection for analog fault dictionary techniques[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(3): 754-761.

[8] GAO Lei, ZENG Guang-zhou. Dynamic testing algorithm based on rough sets for multiple fault diagnosis[C]//Proc of the 5th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 157-163.

[9] 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.