文章编号：1673–1522（2009）06-0695–04

基于扩展单故障策略的多故障诊断算法

王子玲[a]，许爱强[b]，王文双[b]，张公学[a]

（海军航空工程学院 a. 电子信息工程系；b. 科研部，山东 烟台 264001）

摘　要：目前存在的测试性分析和故障诊断工具基本都是基于单故障假设，这一假设已经不适用于拥有很多元器件的复杂系统或者在运行过程中很少或不具备维修机会的系统。针对这一问题，研究了有效的基于扩展单故障策略的多故障序贯测试算法。该算法以最优单故障策略为基础，通过应用附加测试来隔离隐藏故障；通过更新故障状态集，重新调用单故障策略来隔离冒充故障。以某型机载电子设备为例给出实例分析，验证了该算法隔离隐藏故障和冒充故障的有效性。

关键词：故障诊断；扩展单故障策略；多故障策略；隐藏故障；冒充故障；序贯测试

中图分类号：TP39　　**文献标志码**：A

故障诊断理论与技术是近几十年发展起来的一门新学科，它是为适应机械、化工、动力、电力、电子、航空和航天等领域的维修需求而形成的多学科交叉的综合学科，是近年来学术界和工程界研究的热点之一。目前存在的故障诊断工具（策略）通常都基于单故障假设，其中比较成熟的方法是序贯测试算法。文献[1]采用模糊理论与覆盖集理论相结合进行序贯诊断；文献[2]采用相关性模型法研究了“测试点最少”的最佳诊断程序；文献[3]采用遗传算法求解最优序贯测试问题；文献[4]采用AO*启发式搜索算法求解最优成本的序贯测试。上述研究成果均从不同角度、不同程度上解决了最优单故障策略的求解问题。在实际工程应用中，当遇到多故障时，测试维修人员通常会采用连续使用单故障策略来对系统的多故障逐一进行隔离[5]。此方法效率低，不仅造成资源的巨大浪费，而且还影响系统的正常工作，因此连续使用单故障策略绝非多故障诊断的理想方法。[6-8]

本文在单故障序贯测试策略的基础上，研究了一种多故障诊断算法。该算法以最优单故障策略为基础，对于隐藏故障通过应用附加测试来隔离；对冒充故障，通过更新故障状态集，重新调用单故障策略来隔离，最终完成对多故障的诊断。通过实装系统验证，该算法可行。

1 问题描述

多故障序贯测试问题就是应用二值测试结果确定系统的故障状态。假设故障状态是独立的，每个测试提供的信息就是故障状态集合的一个子集，测试将按顺序一直执行下去直到所有故障状态被隔离。故障诊断和隔离过程的最优化是以期望测试成本或者测试时间最小为基础的。在整篇论文中，假设测试可信。

多故障诊断测试顺序问题可用八元组

$$\left(S,\boldsymbol{P},T,\boldsymbol{C},\boldsymbol{B},\tilde{S},\tilde{T},G\right)$$

描述。

式中：

1）$S=\{s_1,\cdots,s_m\}$ 为与系统状态相关的有限集，s_i（$1\le i\le m$）为系统不同的故障状态。

2）$\boldsymbol{P}=[p(s_1),p(s_2),\cdots,p(s_m)]^{\mathrm{T}}$ 是系统状态的先验概率矢量，其中 $i=1,2,\cdots,m$；

3）$T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$ 是 n 个可用测试的有限集，其中每个测试 t_j 检测 S 的一个子集；

4）$\boldsymbol{C}=[c_1,c_2,\cdots,c_n]^{\mathrm{T}}$ 是以时间、人力要求或其他经济指标衡量的测试成本矢量，其中 c_j 是应用于测试的 t_j 成本；

5）$\boldsymbol{B}=\left[b_{ij}\right]_{m\times n}$ 是故障—测试相关矩阵，它表示系统的故障状态 S 和测试 T 之间的关系，如果测试

收稿日期：2009-06-05
基金项目：国家自然科学基金（60874112）
作者简介：王子玲（1978–），女，讲师，博士生；许爱强（1963–），男，教授，博导，博士。

t_j 检测到故障 s_i，则 $b_{ij}=1$；否则 $b_{ij}=0$。

6）$\tilde{S}_i=\left\{t_j\left|b_{ij}=1,1\le j\le n\right.\right\}$，$\tilde{S}_i$ 为故障状态 s_i 的关联测试集，表示能观察到 s_i 的所有测试。本文假设多故障的关联测试集为单故障关联测试集的并集。

7）$\tilde{T}_j=\left\{s_i\left|b_{ij}=1,1\le i\le m\right.\right\}$，$\tilde{T}_j$ 是测试 t_j 的关联故障集，表示能被测试 t_j 检测到的所有故障状态集。

8）$G=\bigcup_{t_j=PASS}\tilde{T}_j$，$G\subseteq S$ 表示未发生故障的状态的集合，即已通过测试的关联故障集。

多故障隔离策略优化问题就等价于搜索能够将系统状态隔离到某个最小碰集的最优测试序列，且该序列满足平均测试成本最低。期望平均测试成本 $\overline{C}$ 的计算公式为：

$$\overline{C}=\sum_{A_I\subseteq A}p(A_I)E(\boldsymbol{C}\mid A_I)=\sum_{A_I\subseteq A}\sum_{t_j\subset R_I}p(A_I)c_j\ ,$$

式中：$E(\cdot)$ 表示期望值；A_I 表示故障并发集，$A_I\subseteq A$；$p(A_I)$ 表示故障并发集 A_I 的概率；$E(\boldsymbol{C}\mid A_I)$ 表示故障并发集 A_I 的总测试成本；R_I 表示隔离故障并发集 A_I 所经测试集。

2 故障掩盖

故障掩盖是指产品的某一个故障由于产品的特点或另一个故障的存在而未被检测出来的状态[6]（当产品中同时存在故障X和故障Y，如只能检测出故障X，则称故障X掩盖了故障Y）。故障掩盖的情况可造成两种故障：隐藏故障和冒充故障，它们都可能是单故障决策树上的多故障候选集成员。

2.1 隐藏故障

故障的表现特征与多故障之内的某个单故障的表现特征相同。由于多故障的行为特征与实际发生的某个单故障相同，容易使诊断出现遗漏，尤其严重的是遗漏了根源故障。

从形式上看，对于故障状态s_i和给定的R_i（由R_i组成决策树），隐藏故障集HF_i的表达式为：

$$HF_i=\left\{s_j\left|\ j\ne i,\ j\ne 0,\tilde{S}_{j|i}\cap R_{pi}=\phi,\right.\right.$$
$$\left.\left.\text{且}\left(\tilde{S}_i\cap R_{fi}\right)\cup\left(\tilde{S}_j\cap R_{fi}\right)=\left(\tilde{S}_j\cap R_{fi}\right)\right\},\right.$$

式中：$R_{pi}\subseteq R_i$，是通过的测试的集合；$R_{fi}\subseteq R_i$，是未通过的测试的集合，$R_{pi}\cup R_{fi}=R_i$；$\tilde{S}_{j|i}=\tilde{S}_j\setminus\left(T\setminus R_i\right)$是$s_j$局限于$R_i$的关联测试集。

2.2 冒充故障

多故障的表现特征与多故障之外的某个单故障的表现特征相同。由于多故障的行为特征与实际发生的某个单故障相同，容易造成误判。

从形式上看，对于故障状态S_i和给定的测试集R_i，冒充故障集MS_i的表达式为：

$$MS_i=\left\{X\left|\ X\subseteq\left(S\setminus s_i\right),\forall s_k\in X,\tilde{S}_{k|i}\cap R_{pi}=\phi,\right.\right.$$
$$\left.\left.\text{且}\bigcup\nolimits_{\forall s_k\in X}\left(\tilde{S}_k\cap R_i\right)=\left(\tilde{S}_k\cap R_i\right)\right\}\right.。$$

单故障诊断策略的叶节点上s_i的多故障模糊组包括冒充故障集MS_i以及冒充故障集MS_i和掩盖故障HF_i的任意组合，如

$$MS_i\cup\left(MS_i\times\{s_i\}\right)\cup\left(2^{HF_i}\times\{s_i\}\right),$$

式中：$\times$表示交叉乘积（向量积）；2^{HF_i}为HF_i的幂。

在故障诊断中，辨别隐藏故障相对比较容易，因为隐藏故障存在于多故障之内，只要判断出系统存在隐藏故障，进行附加测试即可完成对隐藏故障的诊断。相反地，辨别冒充故障显得复杂得多，因为冒充故障存在于多故障之外，所以如果要对每个故障状态列举掩盖故障，那么算法计算复杂度较高，通常需要$O\left(\left|R_i\right|2^m\right)$次操作。

3 基于扩展单故障策略的多故障诊断算法

单故障诊断策略一般用诊断决策树来表述，在本文中，构建多故障决策树时，将单故障决策树作为它的一个基本子过程来调用，所以称本文的方法为基于扩展单故障策略的多故障诊断算法。

基于扩展单故障诊断策略的多故障诊断的基本思路为：首先应用最优单故障诊断策略对被测对象进行故障检测和隔离。如果所隔离的设备单元确实存在故障（假设故障是功能性的），则判断有无隐藏故障，如果存在隐藏故障，在更换或修复该单元后，继续从首个测试（根节点）或首个不通过测试处进行故障检测和隔离，否则结束诊断；如果所隔离的单元不是 100%存在故障，则可能为虚警或冒充故障，那么更换或修复该单元，从被测对象的可疑状态集中排除该组元，重新生成最优单故障策略进行测试，直到系统无故障。

基于上述思路，具体诊断策略生成算法如下：

$$S_0=S=S\cup\{s_0\}。$$

1）根据贝叶斯公式计算 S_0 中各个状态的条件概率 $\hat{P}$。

2）根据 S_0、$\hat{\boldsymbol{P}}$、T、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{B}$，生成最优单故障诊断策略。

3）对于生成的决策树中每一个未解决的叶节点，比如s_i，重复如下步骤：

a）替换/修复 s_i，$G=\{s_i\}\bigcup_{t_j=P}\tilde{T}_j$，$S_0=S_0\setminus G$；

b）对于从根节点达到该叶节点路径上每一个不通过测试，比如t_j，如果$\left|\tilde{T}_j\setminus G\right|=1$（所维修替换的组件确定存在故障）。若$S=\{s_0\}$，则结束诊断；否则从根节点或首个不通过测试节点增加附加测试；标记该节点已解决；

c）如果$\left|\tilde{T}_j\setminus G\right|\neq 1$（所维修替换的组件不是确定故障），替换/修复该单元，并从故障状态集中去掉s_i，即$S_0=S_0\setminus\{s_i\}$，调用单故障诊断策略。

4 验证分析

本文通过对实际设备的故障诊断来验证该算法的有效性。即以某型机载电子设备为例。

该设备共有 7 个 SRU，9 个测试，其状态集$S_0=\{s_0,s_1,\cdots,s_7\}$，测试集$T=\{t_1,\cdots,t_9\}$。其故障测试相关矩阵如表 1 所示（显然 s_1 和 s_2 的关联测试集相同，所以在结论中将 s_1/s_2 看作一个整体来处理，同样情况的还有 s_4 和 s_7。），每个测试的测试成本如表 2 所示，各个 SRU 的故障率如表 3 所示，应用 AO*算法生成的最优单故障测试策略如图 1 所示，而依据本文算法生成的多故障诊断策略见图 2。

表 1　故障—测试相关矩阵

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
s_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_1	1	0	0	1	0	1	0	0	1
s_2	1	0	0	1	0	1	0	0	1
s_3	0	1	0	1	0	0	1	0	1
s_4	0	0	0	0	1	0	0	0	0
s_5	1	1	1	1	0	1	1	1	1
s_6	0	0	0	0	0	1	1	1	1
s_7	0	0	0	0	1	0	0	0	0

表 2　测试成本

测试	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
成本	0.75	0.50	0.50	0.50	0.75	0.50	0.50	0.75	0.50

表 3　SRU 故障率

组成单元	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
故障率/（10^{-6}/h）	2	2	2	2	4	4	10

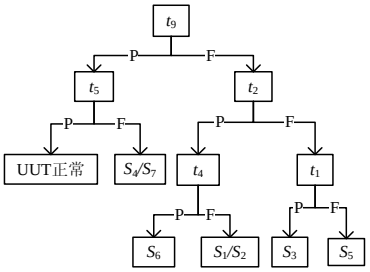


图 1　基于 AO*算法的最优单故障诊断策略

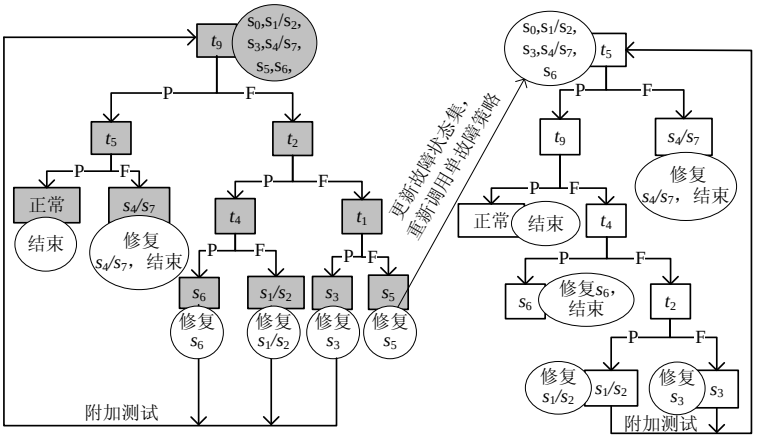


图 2　基于扩展单故障策略的多故障诊断策略

由图 1 和图 2 可以看出：

1）s_6 和 s_4/s_7 同时存在故障。当执行测试 $t_9=f$、$t_2=p$ 和 $t_4=p$，如图 1 所示（单故障策略），得到 s_6 故障的结论；如图 2 所示（多故障策略），隔离并修复 s_6 后，经判断，系统符合存在隐藏故障的条件，所以再应用附加测试 $t_9=p$ 和 $t_5=f$，隔离并修复 s_4/s_7。此即对隐藏故障隔离的情况。

2）当 s_1/s_2 和 s_3 同时存在故障，但是 s_5 不存在故障时，即 s_5 是 s_1/s_2 和 s_3 同时存在故障的冒充故障。如图 1 所示（单故障策略），s_5 故障，显然结论错误。如图 2 所示（多故障策略）：首先，按照单故障的隔离策略执行测试 $t_9=f$、$t_2=f$ 和 $t_1=f$，

隔离并替换 s_5，在故障状态集中去掉 s_5，重新生成单故障策略；接着，执行测试 $t_5 = p$、$t_9 = f$、$t_4 = f$ 和 $t_2 = f$，隔离并修复 s_3；然后，再应用附加测试 $t_5 = p$、$t_9 = f$、$t_4 = f$ 和 $t_2 = p$，隔离并修复 s_1 / s_2；最后，执行测试 $t_5 = p$、$t_9 = p$，说明系统已无故障存在。此即对冒充故障隔离的情况。

3）图 2 中树的阴影部分和图 1 所示的单故障诊断树一样，因此它在决策树中每个 OR 节点的计算复杂性和单故障策略是一样的。

5 结论

本文研究的扩展单故障策略提供了诊断中隐藏故障和冒充故障的解决方法。经过实际系统验证，该算法能够发现系统存在的隐藏故障和冒充故障，有效的实现了对多故障的诊断和隔离。目前该算法已经成功应用于某型军用在役飞机机载电子设备的自动检测系统中,能够较好的完成多故障诊断任务。

参考文献：

[1] 杨叔子，丁洪. 基于知识的诊断推理[M]. 北京：清华大学出版社, 1993:84-86.

[2] 史铁林，杨叔子，师汉民. 基于模糊理论与覆盖技术的诊断模型[J]. 计算机学报, 1992(4):313-317.

[3] 田仲. 测试点的优选方法[J]. 航空学报，1995,16(增刊): 61-64.

[4] 于劲松，徐波，李行善. 基于遗传算法的序贯诊断测试策略生成[J]. 系统仿真学报, 2004,16(4):833-836.

[5] PATTIPATI K R, RAGHAVAN V, SHAKERI M, et al. TEAMS: Testability engineering and maintenance system[C]//American Control Conference, 1994:1989-1996.

[6] 龙兵. 多信号建模与故障诊断方法及其在航天器中的应用研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2005.

[7] A Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.

[8] MOJDEH SHAKERI, VIJAYA RAGHAVAN, R PATTIPATI, et al. Sequential Testing Algorithms for Multiple Fault Diagnosis[J]. IEEE Trans On SMC 2000,30(1):1-14.

An Extended Single-Fault Algorithm for Multiple Fault Diagnosis

WANG Zi-ling[a]，XU Ai-qiang[b]，WANG Wen-shuang[b]，ZHANG Gong-xue[a]

（Naval Aeronautical and Astronautical University

a. Department of Electronic and Information Engineering；

b. Department of Scientific Research，Yantai Shandong 264001，China）

Abstract: Current testability analysis and fault diagnosis tools are basically based on single-fault assumption, which is not suitable for complex systems with large numbers of components and/or systems with little or no opportunity for maintenance during operation. Aiming at this point, a new multi-fault diagnosis algorithm based on extended single-fault strategy was studied. Based on optimal sequential testing algorithm for single fault, the strategy isolated hidden faults with additional tests. For masking faults, the strategy firstly updating failure state set and then invoked the single-fault diagnosis strategy to isolate them. Examples of diagnosing some real system on some active Spacecraft were given to demonstrate the strategy. It is concluded that the strategy can isolate hidden faults and masking faults effectively.

Key words: fault diagnosis; extended single-fault algorithm; multiple-fault strategy; hidden faults; masking faults; sequential testing algorithms