

基于双重Rollout算法的多工作模式系统诊断策略优化

刘远宏

(武警工程大学 装备管理与保障学院, 西安 710086)

摘要: 实际多工作模式系统测试与诊断过程中单一工作模式下测试不能检测和隔离全部故障, 不同工作模式下测试检测和隔离故障的代价和效率也不同, 为以最小的代价实现多工作模式系统的故障隔离与定位, 提出基于双重Rollout算法的诊断策略优化方法. 在构建指定工作模式下的完整诊断策略时, 首先采用第1重Rollout算法, 得到该工作模式下的局部诊断策略和故障模糊集; 针对该工作模式下无法隔离的模糊集, 采用第2重Rollout算法从剩余工作模式中选择切换至最优工作模式下进行隔离, 得到新的局部诊断策略和新的模糊集; 依次类推, 直到故障模糊集为空或已满足系统隔离要求. 实例分析结果表明, 与现有算法相比, 所提出方法得到的解更接近最优解, 期望测试费用更低.

关键词: 测试性设计; 工作模式; 故障隔离; 诊断策略; Rollout算法; 信息启发函数

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

Diagnostic strategies optimization of multi-operating mode system based on double rollout algorithm

LIU Yuan-hong

(College of Equipment Management and Supportability, Armed Police Force Engineering University, Xi'an 710086, China)

Abstract: The equipment system in practice has a variety of operating modes. In fault isolation and localization of multi-mode systems, faults cannot be detected and isolated in a single operating mode, and the cost and the efficiency for detecting and isolating faults are also different in different operating modes. In order to minimize the failure isolation cost of multi-operating mode systems, a diagnosis strategy optimization method for multi-operation modes based on the double rollout algorithm is proposed. Firstly, the first round of the rollout algorithm is adopted to construct the diagnosis strategy under the specific operating mode based on available tests, and the fuzzy set is obtained, based on which the second round of the rollout algorithm is used to select the optimal operating mode. The corresponding fuzzy set is obtained. Repeat these steps until the diagnostic strategy meets isolation requirements. The result of the example shows that the solution obtained by the proposed method is closer to the optimal solution than the existing algorithms, and the expected test cost is lower.

Keywords: design of testability; operating mode; fault isolation; diagnostic strategy; rollout algorithm; information heuristic function

0 引言

针对测试确定条件下的诊断策略优化问题, 目前国内大多采用启发式搜索算法(算法由启发式评估函数和测试排序搜索策略组成). 启发式评估函数决定了算法的适用范围, 排序搜索策略决定了得到的诊断策略的优劣程度. 在构建启发式评估函数时主要考虑以下因素: 测试费用、故障模式的故障率、测

试的故障覆盖率等^[1-5], 测试排序策略主要采用图搜索理论. 常用的诊断策略构建方法主要包括: 贪婪搜索、AO*、准深度搜索、基于信息增量函数和多值逻辑的贪婪搜索算法、Rollout信息启发式算法等, 这些诊断策略构建算法以诊断策略执行费用最少为优化目标, 基本解决了确定测试假设下的多值测试、多故障、多回路、不同隔离层级要求的诊断策略优化问

收稿日期: 2017-08-12; 修回日期: 2018-04-04.

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2017JQ5016); 飞行器海上测量与控制联合实验室开放基金项目(FOM2016 OF11).

责任编辑: 叶丹.

作者简介: 刘远宏(1987-), 男, 讲师, 博士, 从事复杂机电液系统测试性设计与故障诊断等研究.

†通讯作者. E-mail: qingyun16211@163.com.

题^[6-10]. 考虑到工程实践过程中的测试布置费用,文献[11]提出了面向全寿命周期的AOL算法及其改进算法,用于求解单一工作模式系统隔离到故障模式的二值和多值测试诊断策略.

实际装备系统存在多种工作模式,组成系统的可更换单元或子系统往往也存在多种工作状态^[12-13]. 系统中零部件存在多种失效模式^[14],不同工作模式下零部件、可更换单元或子系统故障模式也不同,导致多工作模式系统中故障大都在指定工作模式下可测,测试也大多在指定工作模式下可用. 单一工作模式下不能检测和隔离全部故障,且在同一工作模式不同隔离层级要求下检测和隔离故障的代价和效率也不同. 若想以最小代价构建多工作模式系统的诊断策略,则需要解决两个问题:1) 工作模式切换顺序的优化问题;2) 指定工作模式下的测试执行顺序优化(即单一工作模式下的诊断策略构建). 针对多工作模式系统的诊断策略问题,文献[15]构建了测试费用和模式转换费用之和的优化目标函数. 算法不足在于:在构建多工作模式下的诊断策略时采用的是贪婪搜索策略,贪婪搜索策略本身是一种单步最优搜索策略,由于没有考虑候选测试顺序和后选工作模式切换顺序对诊断策略的影响,且每一步确定的最佳测试或最优工作模式不能再更改,算法得到的是一种局部最优诊断策略,诊断策略中无论工作模式切换顺序还是测试执行顺序均是一种局部的最优,诊断

费用仍偏高. 基于Rollout算法的诊断策略构建实际上是通过基准策略和迭代更新策略构建诊断策略,尽管算法不能保证得到全局最优诊断策略,但是它能得到比基准策略更为精确的结果. 因此,本文提出基于双重Rollout算法的多工作模式系统诊断策略优化方法,用于优化工作模式切换顺序和指定工作模式下的测试执行顺序.

1 多工作模式系统的诊断策略优化问题

假设多工作模式系统的故障-测试相关性矩阵如表1所示,所有测试均为对称测试. 系统包括 N 种工作模式,各工作模式下的切换费用矩阵为 C_{ij} ,其中 C_{ij} 为工作模式 i 切换到 j 的费用, $i = j$ 时, $C_{ij} = 0$. 系统存在 $m+1$ 种状态 $\{f_0, f_1, f_2, \dots, f_m\}$, f_0 表示系统正常状态(为方便叙述,将其当成一种特殊故障状态), $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 为 m 种故障状态,系统故障模式概率集为 $\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_m\}$. K 个测试 $\{T_1, T_2, \dots, T_k\}$,测试 T_k 在各工作模式下的测试表示为 $\{t_{1k}, t_{2k}, \dots, t_{Nk}\}$,第 r 种工作模式下的测试集记为 $\{t_{r1}, t_{r2}, \dots, t_{rK}\}$,对应的测试费用为 $\{c_{r1}, c_{r2}, \dots, c_{rK}\}$. 故障-测试相关性矩阵中测试为二值测试时, d_{ij}^r 取值为0或1,表示第 r 种工作模式下,第 j 个测试 t_{rj} 与第 i 个故障 f_i 的相关关系(相关或不相关). 测试为多值测试时, d_{ij}^r 取值为多值,表示第 r 种工作模式下,第 i 个故障 f_i 发生时第 j 个测试 t_{rj} 的相应输出值.

表1 系统故障-测试相关性矩阵

故障模式	t_{11}	t_{12}	\dots	t_{1K}	t_{21}	t_{22}	\dots	t_{2K}	\dots	t_{N1}	t_{N2}	\dots	t_{NK}	概率
	c_{11}	c_{12}	\dots	c_{1K}	c_{21}	c_{22}	\dots	c_{2K}	\dots	c_{N1}	c_{N2}	\dots	c_{NK}	
f_1	0	0	\dots	0	0	0	\dots	0	\dots	0	0	\dots	0	p_0
f_0	d_{11}^1	d_{12}^1	\dots	d_{1K}^1	d_{11}^2	d_{12}^2	\dots	d_{1K}^2	\dots	d_{11}^N	d_{12}^N	\dots	d_{1K}^N	p_1
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
f_m	d_{m1}^1	d_{m2}^1	\dots	d_{mK}^1	d_{m1}^2	d_{m2}^2	\dots	d_{mK}^2	\dots	d_{m1}^N	d_{m2}^N	\dots	d_{mK}^N	p_m

2 双重Rollout算法的基本原理

2.1 算法的基本流程

采用双重Rollout算法构建指定工作模式下的完整诊断策略流程如图1所示,主要分为以下两个步骤.

Step 1: 依据某一工作模式下故障-测试相关性矩阵和故障模糊集,采用第1重Rollout算法得到该工作模式下的局部诊断策略和故障模糊集,若该模式下故障模糊集为空,或已隔离达到隔离要求,则算法结束,反之转Step 2.

Step 2: 对某一工作模式下无法隔离的故障模糊集,采用第2重Rollout算法在剩余工作模式中选择最优工作模式,得到最优工作模式下的故障-测试相关

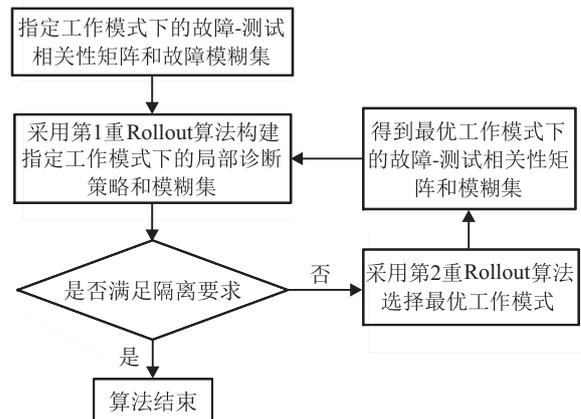


图1 算法的基本流程

性矩阵和故障模糊集合,转至Step 1,切换至最优工作模式下再进行故障隔离。

2.2 第1重Rollout算法

第1重Rollout算法为Rollout信息启发式算法,由基准搜索策略和迭代更新策略构成,用于优化指定工作模式下的局部诊断策略。

2.2.1 基准搜索策略

某一工作模式下测试提供的信息量越大,越有利于故障隔离,同时,在测试过程中尽量使用测试费用小的测试。因此,根据已有的信息增量启发策略,将执行测试所获取系统状态信息增量同测试费用之比作为测试选择的依据,即

$$k = \operatorname{argmax}_j \left\{ \frac{\operatorname{IG}(S, t_j)}{c_j} \right\}. \quad (1)$$

其中: c_j 为测试费用; $\operatorname{IG}(S, t_j)$ 是状态集为 S 时执行测试 t_j 所获得的信息增量,有

$$\operatorname{IG}(S, t_j) = - \sum_{u=1}^U p(S_{ju}, t_j) \log_2 p(S_{ju}, t_j). \quad (2)$$

S_{ju} 为执行测试 t_j 后获得的状态集 S 的子集, $p(S_{ju}, t_j)$ 为状态子集 S_{ju} 的条件概率,其计算方法为

$$p(S_{ju}, t_j) = \frac{\overline{p(S_{ju})}}{\overline{p(S)}}, \quad (3)$$

$\overline{p(S)}$ 为状态集 S 的先验概率, $\overline{p(S_{ju})}$ 为状态子集 S_{ju} 的先验概率。

基准搜索策略是指在测试选择过程中,不断从候选测试集合中选择信息增量最大的测试 T_a ,直到所有故障状态被隔离,具体步骤如下。

Step 1: 待隔离的状态集为 S_i , 测试集为 T , 用 T 中测试 t_j 将状态集合划分为 L_h 个子集 $\{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{iL_h}\}$, 状态子集 S_{il} 的先验概率为

$$p(S_{ij}) = \sum_{f_i \in S_{il}} p(f_i). \quad (4)$$

Step 2: 按照式(3)计算状态子集 $p(S_{il}, t_j)$ 的条件概率。

Step 3: 按照式(1)计算测试集 T 中每个测试的单位费用信息增量,选择单位费用信息增量最大的测试 t_v , 依据测试 t_v 输出结果,将状态集划分为多个状态子集。

Step 4: 重新取测试 t_v 划分的各状态子集为系统状态集,并将测试 t_v 从测试集 T 中删除,重复步骤 Step 1 ~ Step 3,直到状态子集中元素满足隔离要求。

2.2.2 迭代更新策略

Step 1: 采用基准搜索策略获得各子集的优化测试序列,计算该测试序列的期望测试费用。

$$J(S_{il}) = \sum_{k=1}^{m_{il}} \left(\sum_{n=1}^N c_{n s_k} \right) p(f_k, t_j). \quad (5)$$

其中: m_{il} 为状态子集 S_{il} 中状态个数, N 为用于隔离状态 S_{il} 集中状态 f_k 的测试序列长度, $p(f_k, t_j)$ 为状态 f_k 在测试 t_j 下的条件概率,通过式(3)计算。

Step 2: 计算测试的期望测试费用,即

$$J_{t_j} = c_q + \sum_{l=1}^{L_h} J(S_{il}) p(S_{il}), \quad (6)$$

其中 c_q 为测试 t_j 的测试费用。

Step 3: 比较各测试的期望测试费用,选择最低费用的测试 t_{\min} , 依据 t_{\min} 输出结果,将状态 S_i 集进行划分,然后采用式(5)更新状态概率。

Step 4: 重新取各子集为系统状态集,测试为 T 中删除测试 t_{\min} 后的测试集合,重复 Step 1 ~ Step 4,直到测试子集中元素满足隔离要求。

2.3 第2重Rollout算法

基于Rollout算法的工作模式切换顺序优化的基准搜索策略也采用贪婪搜索策略,贪婪搜索策略用于构建工作模式切换序列,而迭代更新策略用于对工作模式切换序列进行评价与迭代更新。算法的核心在于依据优化后的各模式下的故障-测试相关性矩阵和模式切换费用,构建Rollout算法的迭代更新函数和贪婪搜索策略的启发函数。

2.3.1 基准搜索策略

模式选择的标准是可以获得更多的诊断信息,其启发函数为

$$k^* = \operatorname{argmax}_k \left\{ \frac{\operatorname{IG}(S^h; D^k)}{\operatorname{COST}(S^h; D^k) + C_{hk}} \right\}. \quad (7)$$

其中: S^h 表示系统给定状态模糊集 S 、前一个工作模式 m_h 的状态模糊集, D^k 表示对于给定的状态模糊集 S^h 执行模式 m_k 时获得的测试序列(即诊断策略), $\operatorname{IG}(S^h; D^k)$ 表示执行模式 m_k 时得到的诊断信息量, $\operatorname{COST}(S^h; D^k)$ 表示执行模式 m_k 的平均测试费用; C_{hk} 为由模式 m_h 切换成 m_k 时的费用。

$$\operatorname{COST}(S^h; D^k) = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{p(S_i)}{\overline{p(S)}} \sum_{j=1}^{N_{D_i}} c_{D_i[j]} \right\}. \quad (8)$$

其中: N 为诊断策略 D^k 中叶节点的数量, S_i 为诊断策略 D^k 下的第 i 个叶节点, D_i 为由模糊集 S^h 隔离到节点 S_i 经历的测试序列, N_{D_i} 为测试序列中测试的数量, $c_{D_i[j]}$ 为第 j 个测试的测试费用。

基准搜索策略流程如下。

Step 1: 待隔离的模糊集为 S^h , 工作模式集为 M , 总计 n 中工作模式记为 $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 。

Step 2: 针对模糊集 S 分别选择工作模式,采用第

1重Rollout算法进行指定工作模式下的隔离,得到各模式下的诊断策略 D^u 和模糊集 S^u .

Step 3: 依据式(7),逐个计算各工作模式下诊断策略的启发函数值 H_i .

Step 4: 选择启发函数值中 H_i 最大值对应的工作模式 m_r ,作为模糊集 S 下一步切换的工作模式,并得到 m_r 下的各状态子集 $\{S_1^r, S_2^r, \dots, S_y^r\}$,重复Step 1~Step 3,直到状态子集均达到隔离要求.

2.3.2 迭代更新策略

迭代更新策略流程如下.

Step 1: 针对模糊集 S ,选择工作模式 m_a ,采用第1重Rollout算法进行指定工作模式下的故障隔离,得到模式 m_a 下的诊断策略 D_a^0 和状态集 $\{S_a^1, S_a^2, \dots, S_a^g\}$.

Step 2: 分别针对状态集 $\{S_a^1, S_a^2, \dots, S_a^g\}$,采用基准搜索策略得到各状态集下的工作模式切换序列集 M_a 和相应的诊断策略集合 $\{D_a^1, D_a^2, \dots, D_a^g\}$.

Step 3: 针对诊断策略 $\{D_a^0, D_a^1, D_a^2, \dots, D_a^g\}$,分别计算状态集的期望测试费用

$$J(S_a^l) = \sum_{i=0}^m \left\{ \sum_{j=1}^{|p_i|} c_{|p_{i,j}|} + C_{M_i} \right\} p(f_i). \quad (9)$$

其中: $p(f_i)$ 为 S_a^l 中状态 f_i 的条件概率, $|p_{i,j}|$ 为诊断策略中隔离到故障 f_i 所执行的测试序列, $|p_i|$ 为测试数量, $c_{|p_{i,j}|}$ 为第 j 个测试的执行费用, M_i 为隔离到状态 f_i 时工作模式切换序列, C_{M_i} 为模式切换费用.

Step 4: 计算模式 m_a 下的期望测试费用,即

$$J_{m_a} = C_{m_a} + \sum_{z=1}^g J(S_a^z) P(S_a^z). \quad (10)$$

其中: C_{m_a} 为由上一工作模式切换到工作模式 m_a 时的费用, $P(S_a^z)$ 为状态集 S_a^z 的条件概率.

Step 5: 计算各模式的期望测试费用,选择最低费用的测试 m_{\min} ,用 m_{\min} 将状态集 S 进行划分,然后采用式(5)更新状态概率.

Step 6: 重新取各子集为系统状态集,模式集为 M 中删除模式 m_{\min} 后的模式集合,重复Step 1~Step 5,直到状态子集中元素满足隔离要求.

3 实例分析

假设某系统存在3种工作模式,各工作模式下的故障-测试相关关系如表2所示,系统中有5个可用测试,各测试在第 k 个工作模式下记为 $\{t_{k1}, t_{k2}, t_{k3}, t_{k4}, t_{k5}\}$.系统零部件共计有11种状态(包括正常状态),系统3种工作模式下的切换费用如表3所示.

表2 各工作模式下的故障-测试相关关系

故障模式	工作模式1					工作模式2					工作模式3					概率
	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{21}	t_{22}	t_{23}	t_{24}	t_{25}	t_{31}	t_{32}	t_{33}	t_{34}	t_{35}	
	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2	3	2	2	2	3	
f_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.7000
f_1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0.0072
f_2	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0.0303
f_3	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0.0583
f_4	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0.0207
f_5	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0.0356
f_6	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0.0456
f_7	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0.0155
f_8	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0.0136
f_9	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0.0307
f_{10}	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.0425

表3 各工作模式间的切换费用

工作模式	工作模式1	工作模式2	工作模式3
工作模式1	0	5	5
工作模式2	5	5	10
工作模式3	5	5	0

由表2可知,系统处在单一工作模式下均无法隔离全部故障,因此若想隔离所有故障得到各工作模式下完整的诊断策略,则必须进行工作模式切换.不同工作模式下的完整诊断策略不同,以工作模式1为例,

当系统处于工作模式1时,首先采用第1重Rollout算法得到工作模式1下的局部诊断策略和故障模糊集 $\{f_7, f_8, f_9, f_{10}\}$,针对故障模糊集采用第2重Rollout算法优化工作模式切换顺序,得到的完整诊断策略如图2所示,图中“P”和“F”分别对应测试输出为“0”和“1”,即测试“通过”与“不通过”.

采用文献[15]提出的贪婪式搜索算法得到的工作模式1下的完整诊断策略如图3所示,即在优化单一工作模式下的测试执行顺序和工作模式切换顺序时均采用贪婪搜索策略.

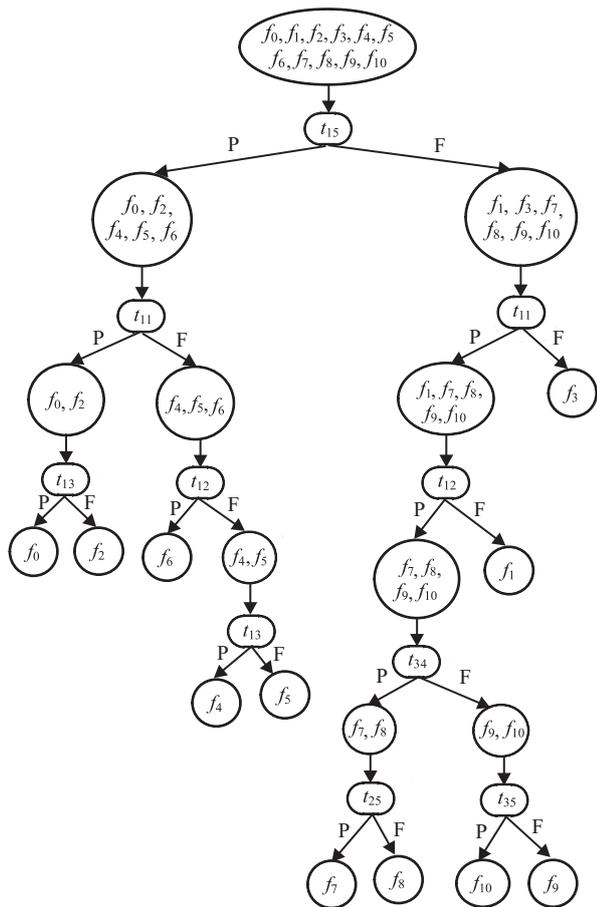


图2 基于双重Rollout算法的诊断策略

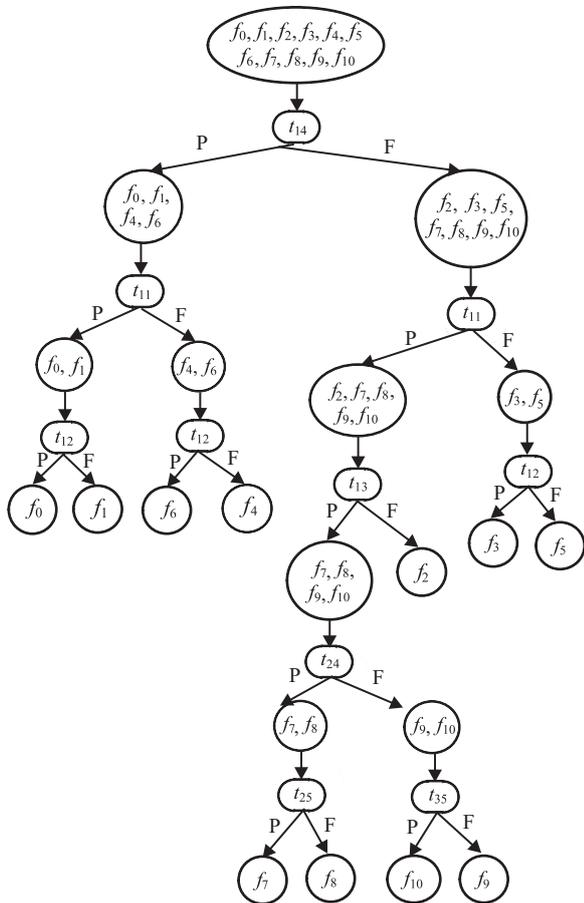


图3 基于贪婪式搜索算法的诊断策略

对比图2和图3可知,工作模式1下的测试执行顺序和工作模式切换顺序均不相同,依据式(10)计算得到图2和图3中的整体期望测试费用分别为17.1354和22.7729.图2和图3中工作模式1下的故障模糊集均为 $\{f_7, f_8, f_9, f_{10}\}$,隔离其余故障模式的顺序不同,即局部诊断策略有所不同,图2和图3中局部诊断策略的期望测试费用分别为7.2236和7.2276.这是由于贪婪搜索算法采用的是单步最优搜索策略,没有考虑当前测试对后续测试的影响,每一步确定的最优测试不能再更改,因此所获得某一工作模式下的测试执行顺序是一种局部最优解.

针对工作模式1下的模糊集合 $\{f_7, f_8, f_9, f_{10}\}$,图2和图3中工作模式切换顺序也不同,其期望测试费用分别为11.7532和17.3597.这是由于贪婪搜索算法没有考虑当前工作模式切换对后续工作模式切换的影响,每一步确定的最优工作模式不能再更改,所获得的工作模式切换顺序也是一种局部最优解.

由此可知,与贪婪式搜索算法相比,本文提出的双重Rollout算法通过单步最优的贪婪搜索策略得到诊断策略,再通过迭代函数更新诊断策略,如此逐步逼近最优诊断策略.算法得到的诊断策略中指定工作模式下的测试执行顺序和工作模式切换顺序均得到了优化.

4 结论

1) 本文提出了基于双重Rollout算法的多工作模式系统的诊断策略构建方法,算法优化了多工作模式系统诊断策略中测试执行顺序和工作模式切换顺序.

2) 本文研究的是多工作模式系统测试确定条件下的诊断策略,而针对多工作模式系统不确定测试条件下的诊断策略构建将是后续研究内容.

参考文献(References)

[1] 国防科学技术工业委员会. GJB2547A-2012装备测试性通用要求[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 2012. (National Defense Science and Technology Commission. GJB2547A-2012 Equipment testing general requirements[S]. Beijing: National Defense Science and Technology Commission Military Publishing House, 2012.)

[2] 邱静, 刘冠军, 杨鹏, 等. 装备测试性建模与设计技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 297-305. (Qiu J, Liu G J, Yang P, et al. Equipment testability modeling and design technology[M]. Beijing: Science Press, 2012: 297-305.)

[3] Mojdeh Shakeri. Advances in system fault modeling and diagnosis[D]. Mansfield: Department of Electrical and Systems Engineering, University of Connecticut, 1996: 147-155.

[4] Raghavan V. Algorithms for sequential fault diagnosis[D]. Mansfield: Department of Electrical and Systems Engineering, University of Connecticut, 1996: 78-82.

[5] Pattipati K R, Alexandridis M G. Application of heuristic search and information theory to sequential fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1990, 20(4): 872-887.

[6] Shakeri M, Pattipati K R, Raghavan V, et al. Near-optimal sequential testing algorithms for multiple fault isolation[C]. IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics. Washington D C: IEEE Press, 1994: 1908-1914.

[7] Tu F, Pattipati K R. Rollout Strategies for sequential fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and humans, 2003, 33(1): 86-99.

[8] 黄以锋, 景博, 罗炳海, 等. 基于Rollout算法的序贯多故障诊断策略[J]. 控制与决策, 2015, 30(3): 572-576. (Huang Y F, Jing B, Luo B H, et al. Sequential multiple fault diagnosis based on rollout algorithm[J]. Control and Decision, 2015, 30(3): 572-576.)

[9] 刘远宏, 刘建敏, 冯辅周, 等. 基于Rollout信息启发式算法的故障诊断策略[J]. 计算机工程, 2015, 40(8): 291-295. (Liu Y H, Liu J M, Feng F Z, et al. Fault diagnosis strategy based on rollout information heuristic algorithm[J]. Computer Engineering, 2015, 40(8): 291-295.)

[10] 杨鹏, 邱静, 刘冠军. 基于多值测试的诊断策略优化生成[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1675-1678. (Yang P, Qiu J, Liu G J. Optimized diagnostic strategy generation with multi-valued tests[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2008, 29(8): 1675-1678.)

[11] Zhang S G, Hu Z, Wen X S. Test sequencing problem arising at the design stage for reducing life cycle cost[J]. Chinese J of Aeronautics, 2013, 26(4): 1000-1007.

[12] 薛鹏. 多模式相控阵雷达系统中的时序控制与信号处理程序设计[D]. 南京: 南京理工大学电子工程与光电学院, 2016: 1-5. (Xue P. Timing control and signal processing program design in multi-mode phased array radar system[D]. Nanjing: School of Electronic and Optical Engineering, University of Science and Technology, 2016: 1-5.)

[13] 熊小玲. 多工作模式独立新能源发电系统分岔行为的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2015: 4-8. (Xiong X L. Research on bifurcation behavior of multi-mode independent new energy power generation system[D]. Nanjing: School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015: 4-8.)

[14] 宋冬利. 多状态多模式受电弓机械系统混合可靠性模型研究[D]. 成都: 西南交通大学数学学院, 2012: 3-8. (Song D L. The mixture reliability model of pantograph mechanical system in a life cycle[D]. Chengdu: School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, 2012: 3-8.)

[15] 杨鹏. 基于相关性模型的诊断策略优化设计技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 98-107. (Yang P. Optimization technology of design for diagnostic strategy based dependency model on dependency model[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 98-107.)

(责任编辑: 孙艺红)

下 期 要 目

随机有限集理论及其在多目标跟踪中的应用和实现 彭华甫, 等

考虑模型响应不确定性的稳健参数设计 冯泽彪, 等

基于模糊粗糙集属性约简与GMM-LDA最优聚类簇特征学习的自适应网络入侵检测 刘金平, 等

考虑能耗与质量的机床构件生产线多目标柔性作业车间调度方法 朱光宇, 等

基于改进QPSO的两轮移动机器人区间二型模糊逻辑控制 佃松宜, 等

混合值逻辑网络的集合稳定 冯俊城, 等

基于时变模型辨识的高速列车复合故障诊断 张坤鹏, 等

基于非结构数据流行学习的碳价格多尺度组合预测 刘金培, 等

勾股模糊偏好关系及其在群体决策中的应用 杨 艺, 等

基于图模型矩阵理论的决策者权力不对称冲突稳定性研究 孔 杨, 等

考虑“时间-资源”的大型客机协同研制GERT网络优化 王嵩华, 等

基于改进前景理论的直觉模糊随机多准则决策方法 高建伟, 等