通断式多态系统扩展测试性建模方法

石君友 王风武 张 鑫 史 萌

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 现有测试性建模方法有一定的约束条件,包括故障判据的一致性、故障传递关系的一致性、测试的逻辑值判据一致性. 针对通断式多态系统具有的状态差异性的特点,提出了一种扩展测试性建模方法. 在引入状态集合的基础上,对故障、测试、***D*** 矩阵和诊断树进行了扩展定义,最后定义了扩展测试性模型. 介绍了扩展测试性建模分析的算法,主要有模型建立算法、扩展 ***D*** 矩阵生成算法、扩展诊断树生成算法. 以某液压操纵系统为例进行了应用,结果验证了方法的可行性和有效性.

关 键 词: 测试性; 测试性建模; 通断式多态系统; 扩展建模; 扩展 ***D*** 矩阵; 扩展诊断树

中图分类号: N 945.12; TP 206$^+$.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)06-0772-06

Method of extended testability modeling for on-off multi-state system

Shi Junyou Wang Fengwu Zhang Xin Shi Meng

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The existing methods for testability-modeling have some constraints, including the consistency of failure criterion, failure transmitting and logical-value criterion of test. Aiming at states differences of on-off multi-state system, the method of extended testability modeling was proposed. Failure, test, ***D*** matrix and diagnostic tree were defined extended with the introduction of states, and an extended testability model was defined also. The algorithms for extended testability modeling and analysis were described, which include modeling, generations of extended ***D*** matrix and extended diagnostic tree. A hydraulic control system was taken as an example for the engineering application, which shows that this method is feasible and effective.

Key words: testability; testability modeling; on-off multi-state system; extended modeling; extended ***D*** matrix; extended diagnostic tree

测试性模型是在系统内单元故障、故障传递关系以及测试分析基础上,建立的故障与测试相关性图形模型,根据该模型可以得到相关性矩阵(***D*** 矩阵)和优化诊断树,并能初步预计故障检测率、故障隔离率等测试性参数[1-2]. 测试性建模方法研究[3-6]在近年来得到了越来越大的重视,并成为与机内测试(BIT, Built-In Test)设计[7-8]、外部诊断测试设计[9]同等重要的设计分析工作之一. 目前,已经有支持测试性建模分析的商业化软件,如 QSI 公司的商用软件 TEAMS,并在航空、航天、地面装备等工程领域得到了应用和推广[10].

通断式多态系统是由多个非线性通断子系统组成的特殊系统,具有明显的状态差异性. 对这种系统采用传统的测试性建模方法进行建模分析时,存在以下难以解决的问题:①不同状态下,系统内单元故障的含义不同;②不同状态下,系统内单元故障的传递关系不同;③不同状态下,系统内各测试的逻辑值判据不同.

针对这些问题,本文提出了可用于通断式多态系统的一种扩展测试性建模方法,在引入状态

收稿日期: 2011-03-10; **网络出版时间**: 2012-05-22 16:23

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120522.1623.027.html

作者简介: 石君友(1973 -),男,黑龙江齐齐哈尔人,高级工程师,shijy016@sina.com.

集合的基础上,对故障、测试、$\boldsymbol{D}$ 矩阵和诊断树进行了扩展定义,并给出了扩展测试性建模分析算法,最后通过典型通断式多态系统案例应用,验证了扩展测试性建模方法的可用性和效果.

1　问题分析

1.1　现有测试性建模方法的约束条件

在现有的测试性建模方法中,存在如下的约束条件.

1) 故障判据的一致性.

在测试性建模时,需要确定系统内的各底层单元故障. 这些单元故障的含义在系统的工作过程中必须是不变的,即故障的判据具有一致性.

2) 故障传递关系的一致性.

对于测试性模型,沿着信号流的方向,故障是可以穿越底层单元向后传递的,即底层单元的工作状态或故障状态不会对故障的传递产生影响,故障传递关系具有一致性.

3) 测试的逻辑值判据一致性.

测试性模型将测试结果处理为二值逻辑,逻辑 0 表示测试结果正常,逻辑 1 表示测试结果故障. 这些测试逻辑值的含义在系统的工作过程中必须是不变的,即测试的逻辑值判据具有一致性.

1.2　通断式多态系统特点与问题

在通断式多态系统内,通常具有一个或多个通断控制单元,利用这些单元的通或断,实现对系统工作状态的控制. 通断式多态系统具有如下特点.

1) 通断控制单元自身的故障判据会发生改变.

在系统工作过程中,为了实现工作状态的切换,需要改变通断控制单元的工作模式. 例如,从接通模式转换到阻断模式,或者从阻断模式转换到接通模式. 在接通模式下,其主要的功能故障是阻断,而在阻断模式下,其主要的功能故障是接通. 因此,通断控制单元在不同工作模式下的功能故障判据不同,在系统工作过程中随着工作模式的转换,其故障判据会发生改变.

2) 故障传递关系会发生改变.

在通断控制单元处于接通模式时,该单元的输入信号可以传递到单元的输出,信号流前端的单元故障可以穿越通断控制单元向后传递. 在通断控制单元处于阻断模式时,该单元的输入信号不能传递到单元的输出,信号流前端的单元故障无法穿越通断控制单元向后传递. 因此,在系统工作过程中,在不同工作状态下故障的传递关系会发生改变.

3) 测试的逻辑值判据会发生改变.

在系统设计中,通常采用容易获取的信号进行测试,将信号量值和测试门限进行比较,判断测试结果为正常或故障. 当信号通路中存在通断控制单元时,通断控制单元工作模式的转变会导致其后面的信号量值发生明显的改变,采用单一的测试门限会导致误判. 因此在系统工作过程中,应根据需要设置不同的测试逻辑值判据.

由于通断式多态系统具有上述的特点,采用现有的测试性建模方法,不能给出统一综合的测试性模型及模型结果,不便于模型结果的工程应用.

2　扩展测试性模型的相关定义

定义 1　状态集合. 状态集合定义为

$$S = \{s_k \mid k = 1,2,\cdots,K\} \tag{1}$$

式中,S 为状态集合;s_k 为系统的第 k 个状态;K 为状态的总数.

定义 2　扩展故障. 扩展故障定义为如下的二元组

$$E^F = (F,F^C) \tag{2}$$

式中,E^F 为扩展故障;F 为故障集合,$F = \{f_i \mid i = 1,2,\cdots,I\}$,$f_i$ 为约定层次的第 i 个单元故障,I 为单元的总数;F^C 为故障判据集合,$F^C = \{f_{ik}^c \mid i = 1,2,\cdots,I;k = 1,2,\cdots,K\}$,$f_{ik}^c$ 为第 i 个单元故障在第 k 个状态下的故障判据.

定义 3　扩展测试. 扩展测试定义为如下的二元组

$$E^T = (T,T^C) \tag{3}$$

式中,E^T 为扩展测试;T 为测试集合,$T = \{t_j \mid j = 1,2,\cdots,J\}$,$t_j$ 为第 j 个测试,J 为测试的总数;T^C 为测试的逻辑值判据集合,$T^C = \{t_{jk}^c \mid j = 1,2,\cdots,J;k = 1,2,\cdots,K\}$,$t_{jk}^c$ 为第 j 个测试在第 k 个状态下的逻辑值判据.

定义 4　特殊传递关系集合. 特殊传递关系集合定义为

$$S^T = \{s_k^t \mid k = 1,2,\cdots,K\} \tag{4}$$

式中,S^T 为特殊传递关系集合;s_k^t 为第 k 个状态下的特殊传递关系,$s_k^t = (s_k^{tf},s_k^{tu})$,$s_k^{tf}$ 为第 k 个特殊传递关系涉及的故障子集,s_k^{tu} 代表第 k 个特殊传递关系涉及的测试子集.

定义 5　扩展测试性模型. 扩展测试性模型定义为如下的七元组

$$E^M = (S,F,F^C,T,T^C,L,S^T) \tag{5}$$

式中,E^M为扩展测试性模型;F 为故障集合;F^C为故障判据集合;T 为测试集合;T^C为测试的逻辑值判据集合;L 为有向边集合,$L=\{L_m \mid m=1,2,\cdots,M\}$,$L_m$为扩展测试性模型的第 m 个有向边,M 为有向边的总数;S^T为特殊传递关系集合.

在此模型中,故障集合 F、测试集合 T、有向边集合 L 由直观表达的图形进行描述;状态集合 S、故障判据集合 F^C、测试的逻辑值判据集合 T^C、特殊传递关系集合 S^T由隐含的属性进行描述.

定义 6 扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵. 扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵定义为如下的三维矩阵

$$\boldsymbol{D}_{I\times J\times K}=[d_{ijk}]_{I\times J\times K} \tag{6}$$

该三维矩阵是由 $I\times J\times K$ 个 $d_{ijk}(1\leqslant i\leqslant I,1\leqslant j\leqslant J,1\leqslant k\leqslant K)$构成的立方体形数据排列,表明了故障与测试在不同状态下的相关性关系. 其中 d_{ijk}为该三维矩阵的元素,其意义如下式所述:

$$d_{ijk}=\begin{cases}1 & \text{系统在状态 } s_k \text{ 下,}\\ & \text{当 } t_j \text{ 可测得 } f_i \text{ 的故障时}\\ 0 & \text{系统在状态 } s_k \text{ 下,}\\ & \text{当 } t_j \text{ 不能测得 } f_i \text{ 的故障时}\end{cases}$$

定义 7 扩展诊断树. 扩展诊断树定义为如下三元组构成的二叉树结构

$$T^R=(N,N^R,N^C) \tag{7}$$

式中,T^R为扩展诊断树;N 为诊断树节点集合,$N=\{n_p \mid p=1,2,\cdots,P\}$,$n_p$为第 p 个诊断树节点,P 为诊断树节点的总数;N^R为诊断树节点父子关系集合,$N^R=\{n_q^r \mid q=1,2,\cdots,Q\}$,$n_q^r$为第 q 个诊断树节点父子关系,$n_q^r=(n_a,n_b)$,其中 n_a为父诊断树节点,n_b为子诊断树节点,Q 为诊断树节点父子关系的总数;N^C为分支集合,$N^C=\{n_q^c \mid q=1,2,\cdots,Q\}$,$n_q^c$为第 q 个诊断树节点父子关系对应的分支.

诊断树节点分为三类:根节点、中间节点、叶节点,根节点用于区分状态,中间节点表示测试,叶节点表示诊断结论;当父诊断树节点为根节点时,父子关系对应的分支为状态,其它情况下的分支为测试的逻辑值判据.

3 扩展测试性建模分析算法

3.1 模型建立算法

扩展测试性模型的建模算法如图 1 所示.

1) 确定状态集合 S.

根据产品的设计方案,分析产品工作原理,确定产品的各工作状态,构成状态集合 S.

2) 建立扩展故障 E^F.

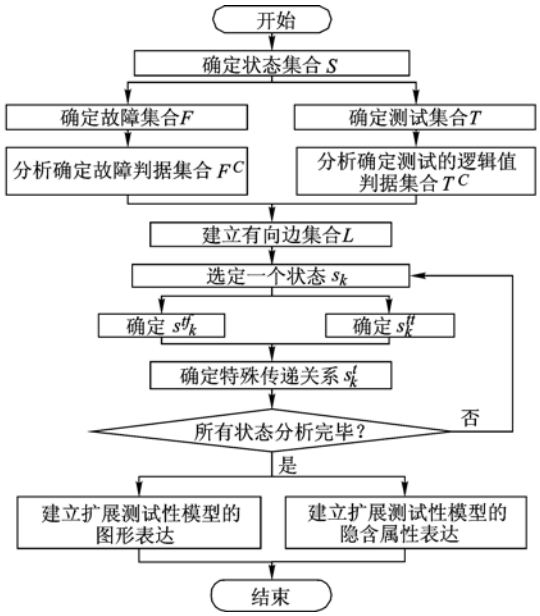


图 1 建模算法

根据建模需求和产品的可靠性设计资料,确定建模的约定层次单元组成,这些单元的故障构成故障集合 F. 分析每个单元故障在各状态下的故障判据,构成故障判据集合 F^C.

3) 建立扩展测试 E^T.

根据产品的测试性设计方案,确定系统的测试点、机内测试、机外测试等,构成测试集合 T. 分析每个测试在每个状态下的 GO(通过)、NOGO(不通过)判据,构成测试的逻辑值判据集合 T^C.

4) 建立有向边集合 L.

根据产品的设计方案,分析约定层次单元之间、以及与各类测试之间的信号流向关系,确定有向边集合.

5) 建立特殊传递关系集合 S^T.

在有向边分析基础上,分析各个状态下的特殊传递关系 s_k^t,建立特殊传递关系集合 S^T,具体如下.

① 确定 s_k^{tf}. 在状态 s_k下,根据故障判据 F^C确定故障集合 F 中各故障的具体含义,分析各单元故障的向后传递关系,并判断与有向边表示的信号向后传递关系是否一致. 由不一致的故障组成 s_k^{tf}.

② 确定 s_k^{tt}. 在状态 s_k下,根据测试的逻辑值判据 T^C确定测试集合 T 中各测试的 GO/NOGO 基准. 对每个测试,分析各单元故障的检测情况,并判断与有向边表示的检测情况是否一致. 由不一致的测试组成 s_k^{tt}.

6) 建立扩展测试性模型的图形表达和隐含属性表达.

根据故障集合 F、测试集合 T、有向边集合 L,

建立故障与测试相关关系的图形描述,即得到扩展测试性模型的图形表达;依据故障集合 F 和测试集合 T,将状态集合 S、故障判据集合 F^C、测试的逻辑值判据集合 T^C、特殊传递关系集合 S^T 等采用属性表方式进行综合描述,即得到扩展测试性模型的隐含属性表达.

3.2　扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵生成算法

扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵生成详细方法如图 2 所示.

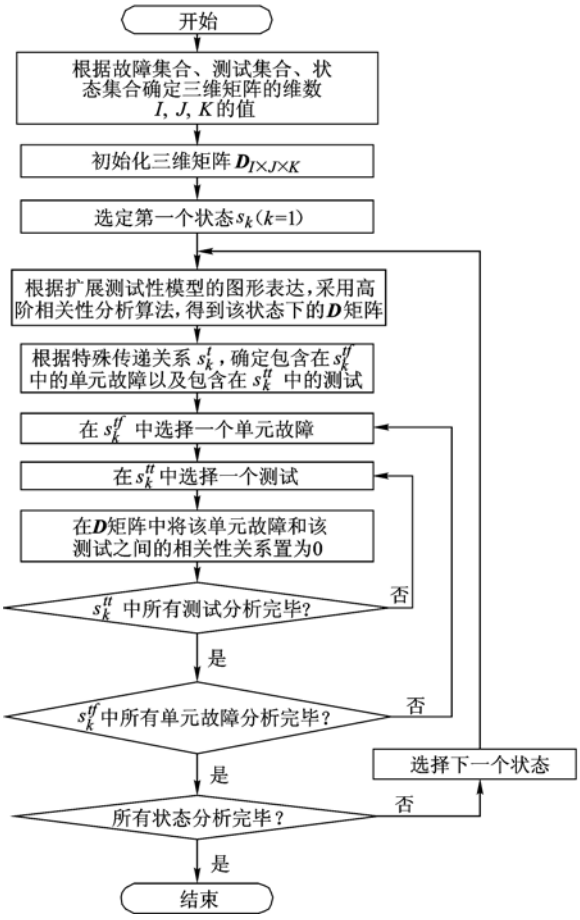


图 2　扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵生成算法

1) 确定三维矩阵的维数,初始化扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵.

根据故障集合、测试集合、状态集合确定三维矩阵的维数 I,J,K 的值,初始化三维矩阵 $\boldsymbol{D}_{I\times J\times K}$.

2) 扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵赋值.

① 从状态集合 S 中选定第一个状态 s_k(k = 1),作为待分析状态;

② 根据扩展测试性模型的图形表达,采用高阶相关性分析算法,得到该状态下的 $\boldsymbol{D}$ 矩阵;

③ 根据特殊传递关系 s_k^t,确定包含在 s_k^{tf} 中的单元故障以及包含在 s_k^{tt} 中的测试;

④ 在 s_k^{tf} 中选择一个单元故障;

⑤ 在 s_k^{tt} 中选择一个测试;

⑥ 在 $\boldsymbol{D}$ 矩阵中将该单元故障和该测试之间的相关性关系置为 0;

⑦ 若 s_k^{tt} 中所有测试分析完毕,则继续下一步;否则,转到步骤⑤;

⑧ 若 s_k^{tf} 中所有单元故障分析完毕,则继续下一步;否则,转到步骤④;

⑨ 选择下一个状态重复步骤②,直到所有状态分析完毕.

3.3　扩展诊断树生成算法

扩展诊断树生成详细方法如图 3 所示.

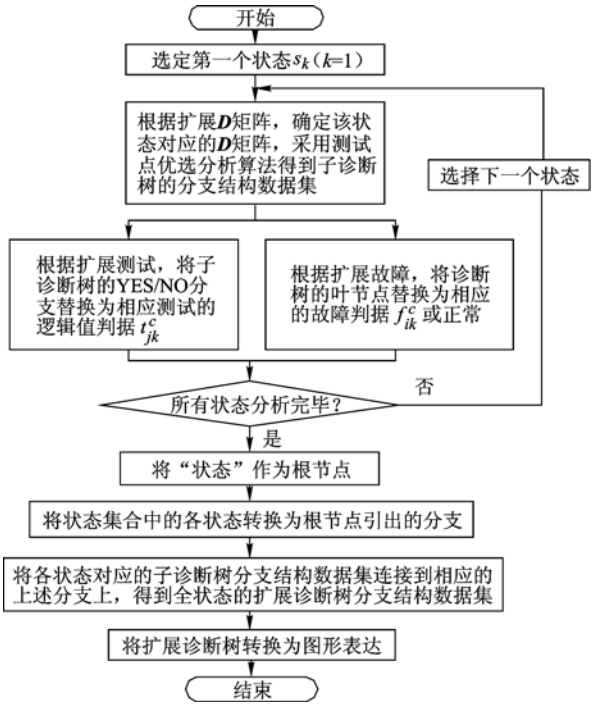


图 3　扩展诊断树生成算法

1) 生成各子诊断树.

① 从状态集合 S 中选定第一个状态 s_k(k = 1),作为待分析状态;

② 根据扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵,确定该状态对应的 $\boldsymbol{D}$ 矩阵,采用测试点优选算法得到子诊断树的分支结构数据集;

③ 根据扩展测试,将子诊断树的 YES/NO 分支替换为相应测试的逻辑值判据 t_{jk}^c;根据扩展故障,将诊断树的叶节点替换为相应的故障判据 f_{ik}^c 或正常;

④ 选择下一个状态重复步骤②,直到所有状态分析完毕.

2) 合成扩展诊断树.

① 将“状态”作为根节点;

② 将状态集合中的各状态转换为根节点引出的分支;

③ 将各状态对应的子诊断树分支结构数据集连接到相应的上述分支上,得到全状态的扩展诊断树分支结构数据集;

④ 将扩展诊断树转换为图形表达.

4 案例应用

某液压操纵系统的组成如图 4 所示,包括一个输入回路与三个控制回路,每个控制回路控制一个作用阀,控制传动齿轮的咬合,进而实现变速. 系统中电磁阀为通断控制单元,系统通过控制它的通/断,控制液压油源的流通,实现不同档位的切换.

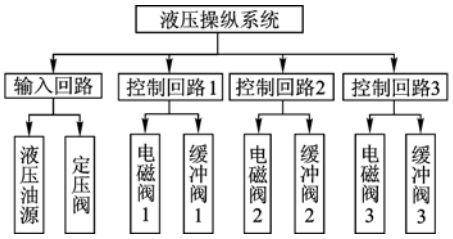


图 4 某液压操纵系统组成

系统的故障单元为:液压油源、定压阀、电磁阀 1、缓冲阀 1、电磁阀 2、缓冲阀 2、电磁阀 3、缓冲阀 3. 系统的状态以及各状态下的电磁阀的通断情况如表 1 所示.

表 1 状态信息

状态	电磁阀 1	电磁阀 2	电磁阀 3
空档	通	断	断
一档	断	通	通
二档	断	断	通

4.1 扩展测试性模型

系统扩展测试性模型的图形表达见图 5. 系统扩展测试性模型的隐含属性包括:状态集合、扩展测试(表 2)、扩展故障(表 3)、特殊传递关系(表 4),其中状态集合为{空档,一档,二档}.

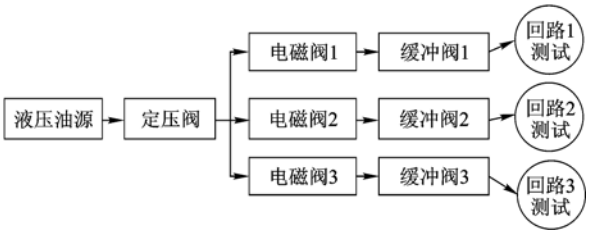


图 5 扩展测试性模型的图形表达

表 2 扩展测试

测试	状态	GO(通过)	NOGO(不通过)
回路 1 测试	空档	大于 2 MPa	小于 0.5 MPa
	一档	小于 0.5 MPa	大于 2 MPa
	二档	小于 0.5 MPa	大于 2 MPa
回路 2 测试	空档	小于 0.5 MPa	大于 2 MPa
	一档	大于 2 MPa	小于 0.5 MPa
	二档	小于 0.5 MPa	大于 2 MPa
回路 3 测试	空档	小于 0.5 MPa	大于 2 MPa
	一档	大于 2 MPa	小于 0.5 MPa
	二档	大于 2 MPa	小于 0.5 MPa

表 3 扩展故障

故障	状态	故障判据
液压油源故障	空档	输出低压
	一档	输出低压
	二档	输出低压
定压阀故障	空档	输出低压
	一档	输出低压
	二档	输出低压
电磁阀 1 故障	空档	常断
	一档	常通
	二档	常通
缓冲阀 1 故障	空档	阻断油压
	一档	阻断油压
	二档	阻断油压
电磁阀 2 故障	空档	常通
	一档	常断
	二档	常通
缓冲阀 2 故障	空档	阻断油压
	一档	阻断油压
	二档	阻断油压
电磁阀 3 故障	空档	常通
	一档	常断
	二档	常断
缓冲阀 3 故障	空档	阻断油压
	一档	阻断油压
	二档	阻断油压

表 4 特殊传递关系

状态	s^{tf}	s^{tt}
空档	{液压油源,定压阀,缓冲阀 2,缓冲阀 3}	{回路 2 测试,回路 3 测试}
一档	{液压油源,定压阀,缓冲阀 1}	{回路 1 测试}
二档	{液压油源,定压阀,缓冲阀 1,缓冲阀 2}	{回路 1 测试,回路 2 测试}

4.2 扩展 *D* 矩阵

系统的扩展 ***D*** 矩阵如表 5 所示.

表 5 扩展 *D* 矩阵

故障	状态								
	空档			一档			二档		
	回路 1 测试	回路 2 测试	回路 3 测试	回路 1 测试	回路 2 测试	回路 3 测试	回路 1 测试	回路 2 测试	回路 3 测试
液压油源故障	1	0	0	0	1	1	0	0	1
定压阀故障	1	0	0	0	1	1	0	0	1
电磁阀 1 故障	1	0	0	1	0	0	1	0	0
缓冲阀 1 故障	1	0	0	0	0	0	0	0	0
电磁阀 2 故障	0	1	0	0	1	0	0	1	0
缓冲阀 2 故障	0	0	0	0	1	0	0	0	0
电磁阀 3 故障	0	0	1	0	0	1	0	0	1
缓冲阀 3 故障	0	0	0	0	0	1	0	0	1

4.3 扩展诊断树

系统的扩展诊断树如图 6 所示.

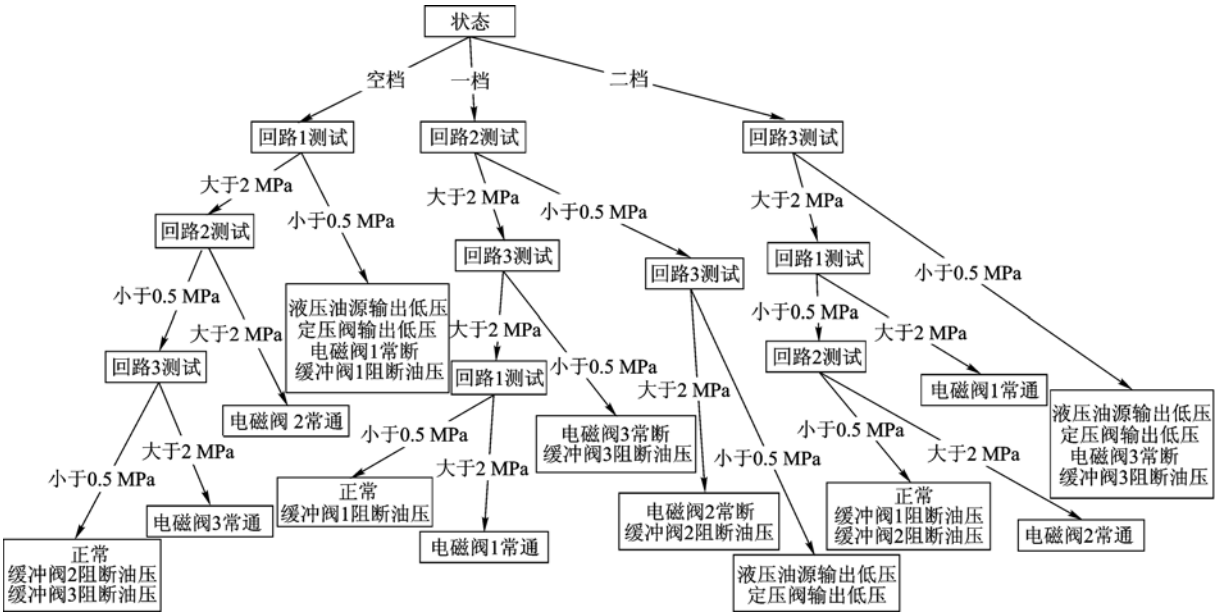


图 6　扩展诊断树

5　结　论

本文提出的扩展测试性建模方法突破了现有测试性建模方法在故障判据、故障传递关系、测试的逻辑值判据一致性上的约束,能够反映通断式多态系统在各个状态下的测试性信息,可用于通断式多态系统的测试性设计分析工作. 生成的扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵与扩展诊断树,为各个状态下的故障诊断提供了综合的诊断策略. 扩展 $\boldsymbol{D}$ 矩阵与扩展诊断树的生成算法可指导开展扩展测试性建模的人工分析,在后续研究中,应在算法基础上设计开发辅助软件以降低人工分析的工作量并提高工作效率.

参考文献（References）

[1] Emmert Gerald. Method for improving design testability through modeling[C]//AUTOTESTCON. Orlando, FL: IEEE, 2010: 1 – 4

[2] Ren Yueqing, Xu Lixin. Testability evaluation based on multi-signal model [C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). Changsha: [s. n.], 2010, 3: 682 – 685

[3] 石君友,龚晶晶,徐庆波. 考虑多故障的测试性建模改进方法[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(3):270 – 273
Shi Junyou, Gong Jingjing, Xu Qingbo. Improvement method for testability modeling with multiple faults[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(3): 270 – 273(in Chinese)

[4] 杨鹏,邱静,刘冠军. 基于扩展的关联模型的测试性分析技术研究[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(2):371 – 374
Yang Peng, Qiu Jing, Liu Guanjun. Research on extended dependency model-based testability analysis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(2): 371 – 374(in Chinese)

[5] 代京,张平,李行善,等. 航空机电系统测试性建模与分析新方法[J]. 航空学报,2010,31(2):277 – 284
Dai Jing, Zhang Ping, Li Xingshan, et al. Novel approach for aviation electromechanical system testability modeling and analysis [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(2): 277 – 284(in Chinese)

[6] Ma Fei, Song Dong, Wang Chuanqing. A new testability model of electronic system and its application[C]//International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM). Taiyuan: [s. n.], 2010, 10: V10-516-V10-520

[7] 石君友,龚晶晶. BIT 综合表示模型研究[J]. 航空学报,2010,31(7):1475 – 1480
Shi Junyou, Gong Jingjing. Study on model for BIT integrated expression[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(7): 1475 – 1480(in Chinese)

[8] Jeffrey Smith, Duane Lowenstein. Built in test-coverage and diagnostics [C]//AUTOTESTCON. Anaheim, CA: IEEE, 2009: 169 – 172

[9] Raik J, Govind V, Ubar R. Design-for-testability-based external test and diagnosis of mesh-like network-on-a-chips[J]. Computers & Digital Techniques, 2009, 3(5): 476 – 486

[10] 李光升,陈旦,程延伟. 基于多信号模型的装甲车辆电源系统诊断策略[J]. 装甲兵工程学院学报,2010,24(4):55 – 58
Li Guangsheng, Chen Dan, Cheng Yanwei. Armored vehicle power system diagnosis strategy based on multi-signal model [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(4): 55 – 58(in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)