

采用故障树分析诊断系统故障的改进方法

陶勇剑, 董德存, 任 鹏

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804, tyj75@yahoo.com.cn)

摘 要: 为了优化系统诊断过程, 提出一种采用故障树分析诊断系统故障的改进方法. 通过故障树分析, 求出所有最小割集、最小割集发生概率、组成单元的诊断重要度. 诊断重要度大的最小割集优先诊断, 最小割集中诊断重要度大的组成单元优先诊断. 当最小割集中诊断重要度最大的组成单元故障时, 包含该组成单元的最小割集应该优先诊断. 根据组成单元的故障顺序, 生成系统的诊断决策树. 这种方法弥补了仅以组成单元的故障重要度确定最小割集诊断顺序的不足, 使得发生概率大的最小割集可以优先诊断, 优化了诊断过程. 通过实例验证了该故障诊断方法的有效性.

关键词: 故障树分析; 故障诊断; 最小割集; 诊断重要度; 诊断决策树

中图分类号: TB114.3

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0143-05

An improved method for system fault diagnosis using fault tree analysis

TAO Yong-jian, DONG De-cun, REN Peng

(School of Traffic and Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China, tyj75@yahoo.com.cn)

Abstract: This paper proposes an improved method to diagnose system faults using fault tree analysis to optimize system diagnosis. All minimal cut sets, their occurrence probabilities and the diagnosis importance of components were determined via fault tree analysis used for system reliability. The order by which the minimal cut sets were checked depended on the diagnosis importance. Components with larger diagnosis importance within a cut set were checked first. Meanwhile, the minimal cut sets containing the component with the largest diagnosis importance were also diagnosed first when the component was fault. According to the diagnostic sequence of system components, a diagnostic decision tree was generated. This method offsets the insufficiency caused by the diagnostic sequence which is merely determined by the diagnosis importance of components. Therefore, the minimal cut set which has larger occurrence probability can be checked first, and the system diagnosis is optimized. An example is given to demonstrate the efficiency of this method.

Key words: fault tree analysis; fault diagnosis; minimal cut set; diagnostic importance factor; diagnostic decision tree

故障诊断方法主要研究系统组成单元诊断的先后顺序问题. 传统故障诊断方法^[1]存在故障原因处理没有区分, 诊断程序固化, 没有突出各故障原因发生概率差异, 无法体现其对系统故障的贡献大小, 不能反映诊断成本、诊断时间等因素对系统故障产生的实际影响等不足. 针对传统故障诊断方法

的缺陷, 文献[2-3]提出了一种利用故障树的定性、定量分析, 确定系统组成单元的故障顺序的方法, 并生成系统诊断决策树. 文献[4]在此基础上, 发展了一种把监控器或传感器并入到故障树中的建模方法, 根据被监控组成单元的状态, 减少需要诊断的最小割集数目, 优化系统诊断决策树的方法. 文献[5]通过故障树分析, 求出所有最小割集、组成单元故障判明效时比, 并据此确定系统组成单元的故障顺序. 这些研究方法仅以组成单元诊断重要度作为诊断顺序的依据, 经常出现发生概率小的最小割集优先诊断的情况. 为了克服这种缺陷, 本

收稿日期: 2008-11-04.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目
(2007AA11Z247).

作者简介: 陶勇剑(1975—), 男, 博士研究生;
董德存(1958—), 男, 教授, 博士生导师.

文提出了一种采用故障树分析诊断系统故障的改进方法. 该方法的主要研究思路是: 利用系统故障树的定性、定量分析, 求出所有最小割集、最小割集诊断重要度(最小割集对系统故障的贡献大小)、最小割集中组成单元重要度^[2-3]; 由于系统故障直接原因就是最小割集的发生, 所以把每个最小割集作为整体进行诊断, 诊断重要度大的最小割集优先诊断; 最小割集中诊断重要度大的组成单元优先诊断, 并且当最小割集中诊断重要度最大的组成单元故障时, 包含该组成单元的最小割集应该优先诊断. 根据系统组成单元的这种诊断顺序, 生成系统诊断决策树^[2-3].

1 系统故障诊断的改进方法

系统故障诊断的改进方法分3部分: 定性分析求出所有最小割集; 定量分析求出最小割集的发生概率和组成单元的诊断重要度; 确定系统组成单元的診断顺序, 生成系统诊断决策树.

1.1 基于ZBDD的故障树定性分析

上行法或下行法^[6]是求解最小割集最直接的方法, 但不适用于复杂系统; 复杂系统可通过二元决策图^[7-9]求解最小割集, 但是确定最佳基本事件排序并不容易. 基于ZBDD的最小割集生成方法^[10]对故障树进行深度优先、从左至右遍历, 把故障树中的OR门和AND门转换成MCS-OR门和MCS-AND门, 通过一系列ZBDD集合基本运算得到MCS-OR门和MCS-AND门的输出, 并将其作为上一层门结构的输入, 递归执行直至最顶层门结构, 最终得到故障树的所有最小割集. ZBDD集合基本运算包括并集、交集、集合差、集合积^[10].

假定 S_1, S_2 是MCS-OR门和MCS-AND门的输入, 其相关基本集合运算为

$$S_c = S_1 \cap S_2, D_1 = S_1 - S_c, D_2 = S_2 - S_c,$$

$$U = D_1 \cup D_2, P = D_1 * D_2, D_3 = U - P,$$

则MCS-OR门输出为 $MCS = S_c \cup D_3$, MCS-AND门输出为 $MCS = S_c \cup P$. 确定了MCS-OR门和MCS-AND门的输出算法, 就可以得到故障树的所有最小割集.

1.2 诊断重要度

最小割集发生是导致系统故障的直接原因, 所以, 把最小割集作为整体逐个进行诊断. 最小割集的诊断顺序是根据其诊断重要度(Diagnostic Importance Factor, DIF)而定的, 诊断重要度大的最小割集优先诊断. 引入最小割集诊断重要度^[2]概念, 即当系统发生故障时, 最小割集发生的概

率. 最小割集诊断重要度数学表达式为

$$DIF_{MCS_i} = P(MCS_i | S). \quad (1)$$

式中: MCS_i 指第 i 个最小割集; DIF_{MCS_i} 指第 i 个最小割集的诊断重要度; $P(MCS_i | S)$ 指系统发生故障的条件下, 第 i 个最小割集发生的概率. 当对一个最小割集进行诊断的时候, 如何确定最小割集中组成单元的診断顺序又是一个问题. 组成单元的診断顺序是受其诊断重要度^[11]决定的, 诊断重要度大的优先进行诊断. 组成单元诊断重要度数学表达式为

$$DIF_{E_i} = P(E_i | S).$$

式中: E_i 是第 i 个组成单元; DIF_{E_i} 是第 i 个组成单元的診断重要度; $P(E_i | S)$ 是系统故障时, 第 i 个组成单元发生故障的概率.

要确定最小割集的診断顺序, 必须求解其診断重要度, 采用式(1), 可得

$$DIF_{MCS_i} = P(MCS_i | S) = \frac{P(S | MCS_i)P(MCS_i)}{P(S)}.$$

式中: $P(S | MCS_i)$ 是第 i 个最小割集故障时, 系统发生故障的概率; $P(MCS_i)$ 是第 i 个最小割集发生故障的概率; $P(S)$ 是系统发生故障的概率. 由于 $P(S | MCS_i)$ 恒等于1, 所以最小割集診断重要度大小排序也就是最小割集发生概率的大小排序, 即最小割集发生概率大的优先診断.

欲求最小割集中组成单元的診断重要度, 应该先求得边缘重要度(Marginal Importance Factors, MIF). 第 i 个组成单元边缘重要度数学表示为

$$MIF_{E_i} = P(S | E_i) - P(S | \overline{E_i}).$$

式中: $P(S | E_i)$ 是第 i 个组成单元故障时, 系统发生故障的概率; $P(S | \overline{E_i})$ 是第 i 个组成单元正常时, 系统发生故障的概率. 确定组成单元边缘重要度之后, 可得组成单元的診断重要度:

$$DIF_{E_i} = P(E_i) + \frac{P(E_i)P(\overline{E_i})}{P(S)}MIF_{E_i}.$$

式中: $P(E_i)$ 是第 i 个组成单元发生故障的概率; $P(\overline{E_i})$ 是第 i 个组成单元正常的概率.

1.3 系统组成单元診断顺序

系统故障診断是以最小割集为整体进行的, 只有当一个最小割集診断结束以后, 才能对下一个最小割集进行診断. 如果一个最小割集中一个或多个组成单元被診断为故障, 应对故障的组成单元进行维修. 维修完成后, 检测系统状态, 如果系统恢复正常, 则故障診断过程结束; 如果系统还是处于故障状态, 则对下一个最小割集进行診断.

系统最小割集的診断顺序一般是由其组成单元的診断重要性决定的^[3-4], 只要最小割集中包

含诊断重要度大的组成单元,这些最小割集就优先诊断,并没有对最小割集诊断重要度,即最小割集发生概率加以考虑.组成单元诊断重要度大只是表明当系统故障时,该组成单元发生故障的概率大;但是,系统故障的直接原因不是某个组成单元发生故障,而是最小割集故障的发生.最小割集中包含诊断重要度大的组成单元,并不能判定最小割集发生概率就大.所以,这种组成单元诊断顺序有可能导致发生概率小的最小割集优先诊断,增加系统故障诊断时间和经济费用.另外,由于不同最小割集中可能包含相同的组成单元,所以,如果完全根据最小割集诊断重要度大小对最小割集进行诊断,会导致某些组成单元重复诊断情况的出现,同样增加系统故障诊断时间和经济费用.

综合考虑最小割集与组成单元两方面的因素,本文提出了一种折衷的组成单元故障诊断顺序.这种故障诊断顺序的排序原则是:

(1) 列出所有最小割集,根据其诊断重要度对最小割集从大到小排序;

(2) 选定诊断重要度最大的最小割集 X ,并对其诊断重要度最大的组成单元 E_1 进行诊断;

(3) 把所有最小割集分成两部分;一部分为包含 E_1 的最小割集,另一部分为不包含 E_1 的最小割集;

a) 如果 E_1 诊断为故障,则选定包含 E_1 的那一部分最小割集;

· 对所有最小割集进行诊断,诊断重要度大的最小割集优先诊断;

· 最小割集诊断过程中,诊断重要度大的组成单元优先诊断;

b) 如果 E_1 诊断正常,则选定不包含 E_1 的那一部分最小割集;

· 选定诊断重要度最大的最小割集 Y ;

· 用 Y 代替 X ,递归循环步骤(2)、(3).

1.4 系统诊断决策树

系统诊断决策树(Diagnostic Decision Tree, DDT)^[2-4]是系统组成单元诊断顺序的树状图形表示,由结点和有向弧组成.诊断决策树的结点表示正在诊断的系统组成单元.结点的弧指向下一个被诊断的组成单元;右弧表示父结点组成单元故障,其指向的结点是与父结点在相同最小割集的其它组成单元;左弧表示父结点组成单元正常,所有包含该结点的最小割集都不会发生,无需诊断这些最小割集;左弧指向与父结点不在相同最小割集的组成单元.系统组成单元诊断顺序确定以后,可以很容易的得到系统诊断决策树.

1.5 系统诊断改进方法的评价指标

系统诊断方法是否优越通常以两个方面来衡量:诊断准确度、诊断时间和经济费用.诊断准确度可用系统诊断完成时,被诊断组成单元的平均数来量化.被诊断组成单元平均数越小,则系统诊断准确度越高.

组成单元故障诊断的排序原则把所有最小割集分成了不同的子集,并确定了该子集中最小割集及其组成单元的诊断顺序.系统诊断决策树中,每个组成单元被诊断概率是根结点到该组成单元的概率,根结点被诊断概率为1.任一结点右弧概率是系统发生故障的条件下,该结点故障的概率.由于任何一个最小割集发生都直接导致系统故障,两个或多个最小割集同时发生的概率很小,本文假定系统诊断目标是查找出一个发生故障的最小割集.所以,系统诊断过程中,被诊断组成单元的平均数 $\bar{N}$,以及平均诊断时间和经济费用 $\bar{C}$ 分别用式(2)和式(3)表示:

$$\bar{N} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{j_i} p_{ik} \right), \quad (2)$$

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{j_i} c_{ik} p_{ik} \right). \quad (3)$$

式中: n 是最小割集子集的个数; j_i 是第*i*个最小割集子集所包含的不同组成单元个数; p_{ik} 是第*i*个最小割集子集中的第*k*个组成单元的被诊断概率; c_{ik} 是第*i*个最小割集子集中的第*k*个组成单元的诊断时间和经济费用.

2 实例分析

以某飞行器发动机滑油压力指示警告系统^[12]为例,该系统包括滑油压力指示系统和滑油压力警告系统两部分.当滑油压力指示系统和滑油低限压力警告系统故障,且发动机滑油系统压力确实过低时,才能损坏发动机.另外,滑油滤堵塞而警告系统没有发生警告信号时,也能损坏发动机.由于发动机滑油压力指示警告系统故障而导致发动机损坏的故障树如图1所示.

发动机损坏故障树中各基本事件故障概率分别为

$$F_{X1} = F_{X12} = 10^{-3}, F_{X2} = F_{X3} = 1.5 \times 10^{-3},$$

$$F_{X4} = 10^{-8}, F_{X5} = F_{X9} = 0.8 \times 10^{-3},$$

$$F_{X6} = 0.5 \times 10^{-8}, F_{X7} = F_{X8} = 1.2 \times 10^{-8},$$

$$F_{X10} = 10^{-5}, F_{X11} = 1.2 \times 10^{-3}.$$

采用ZBDD^[10]方法对故障树进行定性分析,求出所有最小割集.采用不交化方法求出故障树顶事件概率,并求得每个最小割集发生概率、最小割集

中组成单元诊断重要度. 详细数据如表 1 所示.

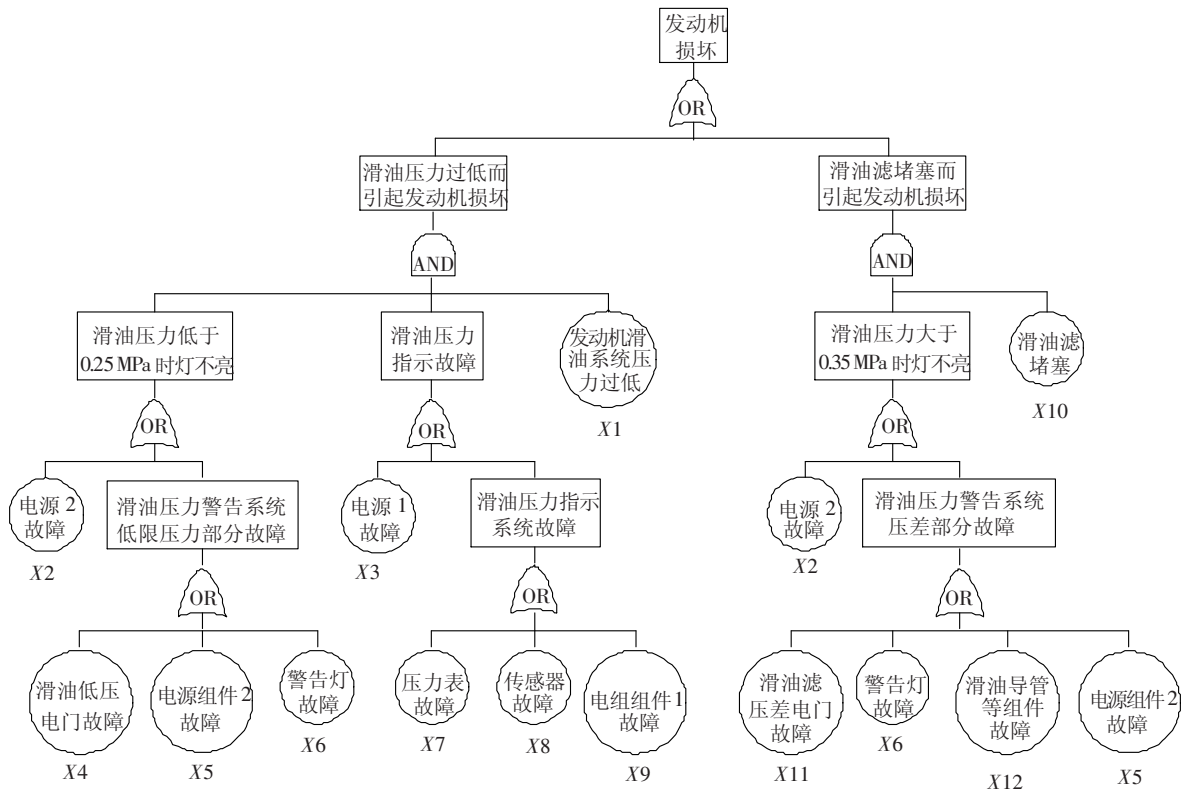


图 1 发动机损坏故障树

表 1 发动机损坏最小割集及诊断数据

最小割集	发生概率	排序	组成单元诊断重要度
X1,X2,X3	$2.25 \cdot 10^{-9}$	5	$9.67 \cdot 10^{-2}, 3.27 \cdot 10^{-1}, 6.37 \cdot 10^{-2}$
X1,X2,X7	$1.8 \cdot 10^{-14}$	10	$9.67 \cdot 10^{-2}, 3.27 \cdot 10^{-1}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X2,X8	$1.8 \cdot 10^{-14}$	10	$9.67 \cdot 10^{-2}, 3.27 \cdot 10^{-1}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X2,X9	$1.2 \cdot 10^{-9}$	6	$9.67 \cdot 10^{-2}, 3.27 \cdot 10^{-1}, 3.96 \cdot 10^{-2}$
X1,X3,X4	$1.5 \cdot 10^{-14}$	12	$9.67 \cdot 10^{-2}, 6.37 \cdot 10^{-2}, 4.37 \cdot 10^{-7}$
X1,X3,X5	$1.2 \cdot 10^{-9}$	6	$9.67 \cdot 10^{-2}, 6.37 \cdot 10^{-2}, 1.78 \cdot 10^{-1}$
X1,X3,X6	$0.75 \cdot 10^{-14}$	16	$9.67 \cdot 10^{-2}, 6.37 \cdot 10^{-2}, 1.11 \cdot 10^{-5}$
X1,X4,X7	$1.2 \cdot 10^{-19}$	18	$9.67 \cdot 10^{-2}, 4.37 \cdot 10^{-7}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X4,X8	$1.2 \cdot 10^{-19}$	18	$9.67 \cdot 10^{-2}, 4.37 \cdot 10^{-7}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X4,X9	$0.8 \cdot 10^{-14}$	15	$9.67 \cdot 10^{-2}, 4.37 \cdot 10^{-7}, 3.96 \cdot 10^{-2}$
X1,X5,X7	$0.96 \cdot 10^{-14}$	13	$9.67 \cdot 10^{-2}, 1.78 \cdot 10^{-1}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X5,X8	$0.96 \cdot 10^{-14}$	13	$9.67 \cdot 10^{-2}, 1.78 \cdot 10^{-1}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X5,X9	$0.64 \cdot 10^{-9}$	8	$9.67 \cdot 10^{-2}, 1.78 \cdot 10^{-1}, 3.96 \cdot 10^{-2}$
X1,X6,X7	$0.6 \cdot 10^{-19}$	20	$9.67 \cdot 10^{-2}, 1.11 \cdot 10^{-6}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X6,X8	$0.6 \cdot 10^{-19}$	20	$9.67 \cdot 10^{-2}, 1.11 \cdot 10^{-6}, 5.25 \cdot 10^{-7}$
X1,X6,X9	$0.4 \cdot 10^{-14}$	17	$9.67 \cdot 10^{-2}, 1.11 \cdot 10^{-6}, 3.96 \cdot 10^{-2}$
X2,X10	$1.5 \cdot 10^{-8}$	1	$3.27 \cdot 10^{-1}, 8.13 \cdot 10^{-1}$
X5,X10	$0.8 \cdot 10^{-8}$	4	$1.78 \cdot 10^{-1}, 8.13 \cdot 10^{-1}$
X6,X10	$0.5 \cdot 10^{-13}$	9	$1.11 \cdot 10^{-5}, 8.13 \cdot 10^{-1}$
X10,X11	$1.2 \cdot 10^{-8}$	2	$8.13 \cdot 10^{-1}, 2.17 \cdot 10^{-1}$
X10,X12	10^{-8}	3	$8.13 \cdot 10^{-1}, 1.82 \cdot 10^{-1}$

对最小割集发生概率排序,发生概率大的最小割集优先诊断;对每个最小割集的组成单元诊断重要度排序,诊断重要度大的组成单元优先诊断. 根据组成单元的诊断顺序,生成了发动机损坏诊断决策树,如图 2 所示. 发动机损坏故障树共有 21 个最小割集,被分成 4 个最小割集子集,即 $\{(X10, X2), (X10, X11), (X10, X12), (X10, X5), (X10, X6)\}, \{(X2, X1, X3), (X2, X1, X9), (X2, X1, X7), (X2, X1, X8)\}, \{(X5, X1, X3), (X5, X1, X9), (X5, X1, X7), (X5, X1, X8)\}, \{(X1, X3, X4), (X1, X9, X4), (X1, X3, X6), (X1, X9, X6), (X1, X7, X4), (X1, X8, X4), (X1, X6, X7), (X1, X6, X8)\}$.

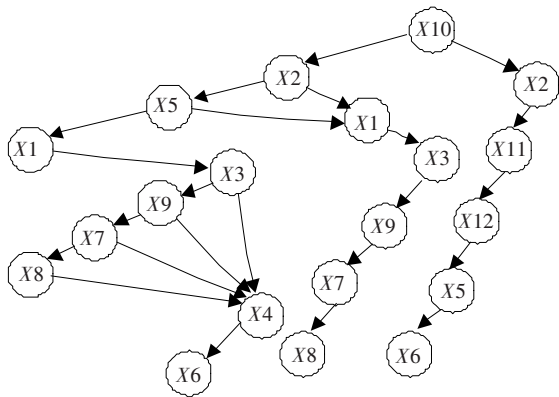


图 2 发动机损坏诊断决策树

由于每个最小割集子集中的不同组成单元的被诊断概率可以容易得到,所以根据式(2)可以求得 $\bar{N}$ 近似等于3.995.如果每个组成单元诊断时间和经济费用已知,则根据式(3)可以求出平均诊断时间和经济费用.

仅以诊断重要度来确定组成单元诊断顺序的方法^[11],其被诊断组成单元的平均数 $\bar{N}$ 近似等于4.101.比较可知,故障诊断改进方法的被诊断组成单元平均数较小,诊断准确度有所提高.一般情况下,诊断准确度的提高有助于节省诊断时间和经济费用.

3 结 论

采用故障树分析诊断系统故障的改进方法利用系统故障树的定性分析,求出所有最小割集;通过系统故障树定量分析,确定最小割集及其组成单元的诊断顺序.最小割集诊断顺序依据其发生概率大小而定,发生概率大的最小割集优先诊断;组成单元诊断顺序依据其诊断重要度大小而定,诊断重要度大的组成单元优先诊断.这种组成单元故障诊断排序方法兼顾了发生概率大的最小割集诊断优先性与包含诊断重要度大的组成单元的最小割集的诊断优先性,一定程度上避免了发生概率小的最小割集优先诊断的情况,提高了系统诊断准确度.采用故障树分析诊断系统故障的改进方法有助于准确诊断故障原因,节省诊断成本,优化系统诊断过程.

参考文献:

- [1] 王江萍. 机械设备故障诊断技术及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2001: 2-6.
- [2] ASSAF T, DUGAN J B. Automatic generation of diagnostic expert systems from fault trees [C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003 Annual. Tampa Florida, USA: IEEE Reliability Society, 2003: 143-147.
- [3] ASSAF T, DUGAN J B. Diagnostic expert systems from dynamic fault trees [C]//Reliability and Maintainability Annual Symposium-RAMS. Los Angeles, CA, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004: 444-450.
- [4] ASSAF T, DUGAN J B. Diagnosis based on reliability analysis using monitors and sensors [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93 (4): 509-521.
- [5] 倪绍徐, 张裕芳, 易宏, 等. 基于故障树的智能故障诊断方法 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42 (8): 1372-1375.
- [6] 李海泉, 李刚. 系统可靠性分析与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] REAY K A, ANDREWS J D. A fault tree analysis strategy using binary decision diagrams [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 78(1): 45-46.
- [8] RAUZY A. New algorithms for fault tree analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1993, 40 (3): 203-211.
- [9] DU Suguo, SUN Yan. A novel ordering method of binary decision diagram [C]//International Conference on Management Science & Engineering. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 299-304.
- [10] TANG Z, DUGAN J B. Minimal Cut Set/Sequence Generation for Dynamic Fault Trees [C]//Reliability and Maintainability Annual Symposium. Los Angeles, CA, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004: 207-213.
- [11] ASSAF T, DUGAN J B. Design for diagnosis using a diagnostic evaluation measure [J]. Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, 2006, 9 (4): 37-43.
- [12] 徐克俊, 金星, 郑勇煌. 航天发射场可靠性安全性评估与分析技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 134-138.

(编辑 赵丽莹)