

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211599

基于动态故障树的汽车系统故障诊断方法*

钟志成^{1,2} 徐封杰¹ 李超超^{1,2} 武恪^{1,2} 方菱¹

(1. 中科院合肥物质科学研究院 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要: 为了提高汽车故障诊断效率,降低诊断代价并解决静态故障树(SFT)无法描述汽车系统中动态失效序列的问题,提出一种基于动态故障树(DFT)的汽车系统故障诊断方法。首先,利用DFT建立系统的失效模式模型,并采用顺序二元决策图(SBDD)计算DFT的最小割集(MCS);然后计算MCS以及MCS中组件的诊断重要度(DIF);并在此基础上给出基于统一诊断服务(UDS)协议的汽车故障诊断方法,将诊断故障码对应的MCS过滤并排序,优先诊断DIF大的MCS和系统组件;最后通过一个汽车主动转向系统的应用实例对本文方法的有效性进行验证。案例分析结果表明,所提方法能够计算汽车故障诊断MCS序列,可以有效指导汽车故障诊断工作。

关键词: 故障诊断;动态故障树;顺序二元决策图;割集

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Fault diagnosis method for automobile system based on dynamic fault tree

Zhong Zhicheng^{1,2} Xu Fengjie¹ Li Chaochao^{1,2} Wu Ke^{1,2} Fang Ling¹

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of automobile fault diagnosis and reduce the cost of diagnosis, this paper proposes a fault diagnosis method of automobile system based on Dynamic Fault Tree (DFT). Firstly, the failure mode model of the system is the DFT is established by using DFT, and the DFT is transformed into a sequential binary decision diagram (SBDD) to calculate the minimum cut set (MCS). Secondly, the diagnostic importance (DIF) of the MCS and the components in the MCS is calculated. On this basis, a diagnosis method for automobile based on the Unified Diagnostic Service (UDS) protocol is proposed. The MCS corresponding to the diagnostic trouble codes are filtered and sorted, and MCS and components with large DIF are prioritized for diagnosis. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by the case study of an Active Rear Steering system. The case analysis results show that, the proposed method can calculate the fault diagnosis sequence and can effectively guide the vehicle fault diagnosis work.

Keywords: fault diagnosis; dynamic fault tree; sequential binary decision diagram; cut set

0 引言

故障诊断是汽车维护的关键任务之一,其效率和有效性可以节省大量的时间和成本并有效提高汽车服务组织的生产率,从而提高其盈利能力^[1]。随着汽车的复杂性和先进性日益增长,汽车诊断的难度也在不断增加,如何提高汽车故障诊断的准确性和效率成为汽车诊断领域的热点问题^[2]。目前,车辆诊断技术主要分为在线诊断和离线诊断两部分,在线诊断是指当车辆发生故障时,在线诊断系统会检测到系统故障,根据故障类型做出一些保护措施并在汽

车中存储诊断故障码(diagnostic trouble code, DTC)。离线诊断是指在车辆维护或维修时,通过诊断通信协议从汽车内部的存储设备中读取DTC来对故障原因进行定位^[3]。DTC具有一定的诊断能力,可能会指示故障产生的根本原因。但是由于汽车中的电子元件之间可能存在依赖关系,一个元件失效可能会使其他元件无法正常工作并生成大量的级联DTC,这就导致精确定位故障部件变得十分复杂和困难。目前,汽车故障诊断还十分依赖诊断工程师自身知识和经验,需要人工分析大量的DTC来定位和修复故障,故障诊断效率不高。因此,结合目前主流的汽车诊断技术,

收稿日期:2022-10-04

* 基金项目:安徽省重点研究与开发计划项目(202004a05020041)资助

找到一种能够有效提高汽车诊断效率,降低汽车诊断成本的方法具有重要意义。

在进行汽车故障诊断之前,计算出合理的诊断序列,可以有效指导汽车诊断工作,提高汽车诊断的效率。故障树分析法(fault tree analysis,FTA)是定性和定量分析系统典型故障的可靠分析方法^[4]。目前,FTA被广泛应用于汽车系统的可靠性和诊断序列分析,利用故障树(fault tree, FT)不仅可以在系统设计时检验系统的可靠性,还能为故障诊断序列的计算提供理论依据,在系统故障时有效指导诊断工作。梁杰等^[5]给出一种基于故障树的机车诊断系统设计方法,利用故障树形成知识库实现对机车故障的逻辑推理和诊断,为机车检修和故障序列的计算提供了决策依据。Liang等^[6]提出了一种用于汽车发动机系统故障模式分析的方法,建立了汽车发动机系统常见故障模式的故障树。通过对故障树的定性和定量分析,得到系统常见故障模式的组合,为维修人员确定故障诊断序列提供参考依据。Zhang等^[7]提出了基于故障树的汽车电源的贝叶斯网络故障诊断模型,通过故障树和贝叶斯网络之间的映射关系构建故障的模糊贝叶斯网络模型。根据贝叶斯网络推断算法确定相关的故障点概率值,并指导故障诊断序列。James等^[8]利用有向图模型对汽车系统结构方法的扩展,考虑汽车系统各子系统/部件在正常和故障状态下的输入输出参数关系,建立系统有向图,并推导出表示汽车系统异常或故障的故障树,以帮助维修人员进行有效的诊断。

当前的研究工作主要利用静态故障树(static fault tree,SFT)对汽车中的子系统进行故障建模和失效模式分析,利用FTA并结合其他的形式化分析方法计算系统的失效模式或诊断序列。但是,SFT无法描述系统的动态失效特征,例如组件存在备件,组件失效模式存在时序等情况,缺乏对系统中动态故障序列的分析能力。动态故障树(dynamic fault tree,DFT)是静态故障树的拓展模型,它在静态故障树的基础上增加了优先与门(priority-AND gate,PAND)、备件门(SPARE,SP)、功能相关门(functional dependency gate,FDEP)等动态门。动态门不仅能体现事件之间的逻辑关系,还包含了系统组件失效的时序信息,弥补了SFT分析方法的缺陷^[9]。在动态故障树分析方面,早期DFT分析多采用Markov模型,并使用模块化方法将DFT分为静态子树和动态子树,其中静态子树用二元决策图(binary decision diagram,BDD)求解,动态子树用Markov链模型求解,模块化方法缓解但并未解决DFT分析状态空间爆炸问题。随着对DFT分析方法的不断深入,顺序二元决策图(sequential binary decision diagram,SBDD)分析法作为一种高精度、适用性强的方法被广泛关注,其计算效率高于Markov方法^[10]。针对目前汽车故障诊断方法较少考虑系统中动态失效序列的问题,本文使用DFT对汽车系统进行故障事件建模,采用SBDD分析法的计算故障诊断序列,并结合目前主流的汽车诊断通信协议

提出一种汽车故障诊断方法,以提高汽车故障诊断的效率,降低诊断代价。

1 故障诊断序列计算方法

1.1 方法概述

为了计算汽车故障诊断序列,首先要使用DFT对系统中可能存在的故障事件建模。建模完成后,需要将DFT转换为SBDD来计算DFT的最小割集(minimum cut set,MCS)。然后计算MCS和系统组件的诊断重要度(diagnostic importance factor,DIF)。最后,对MCS和MCS中的组件进行排序并计算系统的诊断序列。故障诊断序列计算流程如图1所示。

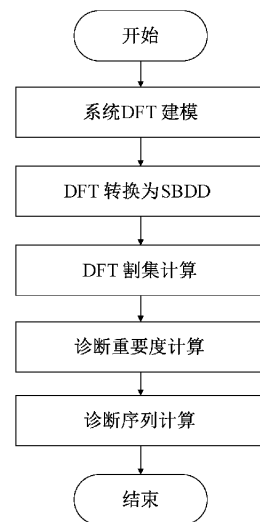


图1 系统故障诊断序列计算方法

1.2 DFT割集计算方法

寻找导致系统故障的失效模式是故障树分析的关键步骤,割集描述了系统的不同失效路径,计算故障树的割集是故障树定性分析的主要工作。下面给出故障树的割集和最小割集定义。

定义1:故障树的割集是导致系统发生故障的失效事件集合。

$\exists V^c, \forall v_c \in V^c, \text{有 } v_c \in V^i, \text{若集合 } V^c \text{ 中的基本事件全部发生,故障树顶事件会发生,则 } V^c \text{ 是故障树的一个割集, } V^i \text{ 是故障树基本事件的集合。}$

定义2:故障树的最小割集是导致系统发生故障的最小事件集合。

$\exists V^c, \forall v_c \in V^c, \text{有 } v_c \in V^i, \text{若集合 } V^c \text{ 是故障树的割集,且去掉 } V^c \text{ 中的任何一个元素后, } V^c \text{ 不再是故障树的割集,则 } V^c \text{ 是故障树的一个最小割集, } V^i \text{ 是故障树基本事件的集合。}$

二元决策图是基于香农分解的有向无环图,是一种有效的故障树割集计算方法^[11]。对一个由变量集合 x_1, x_2, \dots, x_n 定义的布尔表达式 f ,利用香农分解可以将它等

价分解为:

$$f = x_i \cdot f_{x_i=1} + \bar{x}_i \cdot f_{x_i=0} = ite(x_i, f_{x_i=1}, f_{x_i=0}) \quad (0 \leq i \leq n) \quad (1)$$

其中, $f_{x_i=1}$ 是 $x_i = 1$ 时的 f 表达式, $f_{x_i=0}$ 是 $x_i = 0$ 时的 f 表达式, ite 是 If-Then-Else 的缩写。 ite 支持嵌套结构, 可以用 ite 结构描述故障树的失效路径。

割序列是 DFT 的割集表示, 割序列可以体现基本事件失效的时间先后顺序^[12]。下面给出割序列的定义。

定义 3: 动态故障树的割序列是导致系统发生故障的失效事件集合, 并且失效事件的发生存在时间顺序。

$\exists V^c, \forall v_c \in V^c$, 有 $v_c \in V^l$, 设 $V^c = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 若集合 V^c 中的基本事件全部发生, 且 e_1, e_2, \dots, e_n 的失效时间满足关系 $T_{e_1} < T_{e_2} < \dots < T_{e_n}$ 时, 故障树顶事件会发生, 则 V^c 是动态故障树的一个割序列, 割序列记作 $e_1 \rightarrow e_2 \rightarrow \dots \rightarrow e_n, V^l$ 是动态故障树基本事件的集合。

SBDD 在 BDD 的基础上, 用故障树动态门对应子树的割序列替换动态门, 然后将替换后的故障树转换成 SBDD 模型, 利用 SBDD 可以计算 DFT 的不变化割集^[13]。SBDD 生成算法使用自底向上方法, 利用香农公式构建根节点, 如式(2)所示。

$$S \langle op \rangle C = ite(x, S_1, S_0) \langle op \rangle ite(y, C_1, C_0) = \begin{cases} ite(x, S_1 \langle op \rangle C, S_0 \langle op \rangle C) \text{index}(x) < \text{index}(y) \\ ite(x, S_1 \langle op \rangle C_1, S_0 \langle op \rangle C_0) \text{index}(x) = \text{index}(y) \\ ite(y, C_1 \langle op \rangle S, C_0 \langle op \rangle S) \text{index}(x) > \text{index}(y) \end{cases} \quad (2)$$

其中, S 和 C 表示遍历子树结构函数的两个布尔公式, $\langle op \rangle$ 代表逻辑操作 AND 或 OR, x 和 y 表示底事件, $\text{index}(v)$ 表示底事件 v 的排序。

图 2 所示的动态故障树可以转换为不含动态门的 DFT 模型, 将备件动态门转换为割序列 $E1 = x_2 \rightarrow \bar{x}_2 x_3$, 将级联的两个优先与门转换为割序列 $E2 = x_4 \rightarrow x_5 \rightarrow x_6$, 用割序列替换对应的动态门可以得到如图 3 所示的故障树 2。

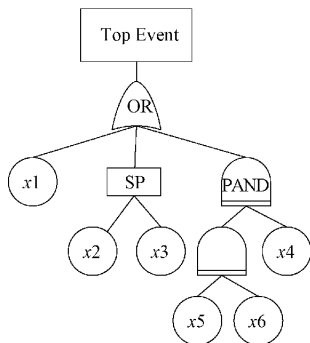


图 2 动态故障树示例

利用式(2)可以将图二故障树转化为图 4 所示的 BDD 模型, 根据该 BDD 模型可知该故障树的最小割集为 $\{x_1\}, \{x_2 \rightarrow \bar{x}_2 x_3\}, \{x_4 \rightarrow x_5 \rightarrow x_6\}$

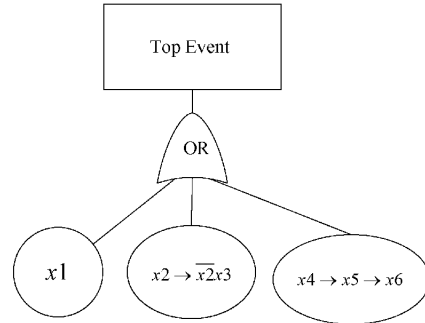


图 3 替换动态门后的动态故障树

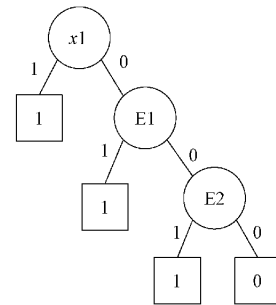


图 4 与故障树示例对应的 BDD

1.3 诊断重要度计算

计算出 DFT 的最小割集后, 可以得到导致系统故障的失效事件集合, 该集合对系统诊断具有重要指导意义。根据失效组件集合进行故障诊断可避免非必要的组件诊断, 提高诊断的效率。最小割集的诊断顺序由其诊断重要度决定, 即诊断系统失效时, 优先诊断故障率最高的组件集合。诊断重要度的定义如式(3)所示。

$$DIF(MCS_i) = P(MCS_i | S) = \frac{P(S | MCS_i)P(MCS_i)}{P(S)} = \frac{P(MCS_i)}{P(S)} \quad (3)$$

即 MCS_i 的诊断重要度等于系统故障时 MCS_i 发生的概率, MCS_i 表示系统中的第 i 个最小割集。根据贝叶斯公式, MCS_i 的诊断重要度等于 MCS_i 发生的概率除以系统故障发生率 $P(S)$ 。 $P(S)$ 是一个定值, 因此按 DIF 排序等价于按最小割集发生概率排序。 MCS 的发生概率可以根据 MCS 中是否存在割序列分别进行计算。对不存在割序列的 MCS , 假设故障树中共有 m 个基本事件且它们之间相互独立, MCS_i 中共有 n 个基本事件, 则 $P(MCS_i)$ 等于 MCS_i 中的 n 个基本事件的发生概率之积, 式(4)为 MCS 发生概率的数学表示。

$$P(MCS_i) = \prod_{x_j \in MCS_i} P(x_j) \quad (4)$$

对存在割序列的 MCS , 由于割序列中的基本事件的发生存在先后顺序, 无法直接通过式(4)计算 $P(MCS)$ 。因此, 需要先计算 MCS 中割序列的发生概率 $P(CS)$, 然后将 $P(CS)$ 代入式(5)计算 $P(MCS)$ 。

$$P(MCS_i) = \prod_{x \in MCS_i} P(x) \cdot \prod_{cs \in MCS_i} P(cs) \quad (5)$$

这里采用 Markov 方法^[14]来求解 $P(cs)$, 首先将割序列对应的动态逻辑门转换为 Markov 状态图, 然后将状态图转换成若干条状态转移链, 对不同长度的状态转移链应用式(6)并综合各链的计算结果来计算割序列的发生概率, 其中 λ 表示状态之间转移的概率。

$$P_n(t) = \prod_{r=0}^{n-1} \lambda_{r,r+1} \left[\prod_{k=0}^n \frac{e^{-\lambda_{k,k+1} \cdot t}}{\prod_{r=0, r \neq k}^n (\lambda_{r,r+1} - \lambda_{k,k+1})} \right] \quad (6)$$

计算出所有 MCS 的发生概率后, 将 MCS 按 $P(MCS)$ 排序, 并按顺序对所有 MCS 进行诊断。针对 MCS 中的不同组件, 优先诊断系统失效时组件失效概率大的组件。基本事件的 DIF 表示系统失效时基本事件发生的概率, DIF 的定义如式(7)所示。

$$DIF(s, c) = P(c | s) = \frac{P(c \cdot s)}{P(s)} \quad (7)$$

其中, c 代表基本事件, s 代表系统失效状态。参考文献[15]的方法, 可以将前面计算出的 MCS 的发生概率代入式(8)和(9)来估算 $DIF(s, c)$ 的值, 其中 $MCS(s)$ 表示系统的 MCS 集合。

$$DIF(s, c) \approx \frac{P(c) \cdot P(s | c)}{\sum_{i=0}^n P(MCS_i)} \quad (8)$$

$$P(s | c) \approx \sum_{c \in MCS(s)} P(e) + \sum_{mcs \in MCS(s), c \notin mcs} P(mcs) \quad (9)$$

2 基于 UDS 的故障诊断方法

统一诊断服务(unified diagnostic services, UDS)是一种基于 C/S 架构的诊断通信协议, 定义了一组通用的诊断服务, 例如会话控制服务, 安全访问控制服务等, 是汽车内外部通讯的重要手段之一^[16]。UDS 中的读取故障码服务可以读取汽车电控单元(electrical control unit, ECU)中存储的 DTC, DTC 记录了故障或异常信息。汽车中的每个子系统都有一组对应的 DTC 来描述该系统的故障信息, 子系统中组件失效可能会激活一个或多个 DTC。诊断工程师可以基于 DTC 信息进行故障组件测试, 从而定位故障发生的根本原因。由于汽车系统的复杂性较高, 每一个 DTC 都可能多个触发源, 即一个 DTC 可能对应多种失效模式, 可以用 DFT 来描述触发该 DTC 的失效模式集合, 并利用第 1 节的方法计算出 DFT 对应的 MCS 和 DIF 来指导故障诊断工作。

当汽车故障时, 维修人员可能只关注激活的 DTC。但是, 未激活的 DTC 中也包含一些有用的信息, 利用未激活的 DTC 可以过滤一部分激活 DTC 中不可能发生的 MCS, 以消除不必要的测试。假设激活的 DTC 集合为 ACT, 未激活的 DTC 集合为 UACT, 过滤过程可以分 3 个步骤: 1) 计算 ACT 对应的 MCS 集合 ATC_MCS; 2) 计算 UACT 的

DTC 对应的 MCS 集合 UACT_MCS; 3) 遍历 ATC_MCS 中的 MCS, 设当前 MCS 为 mcs, 若 mcs 在 UACT_MCS 中, 说明该割序列不会发生, 从 ATC_MCS 中删除 CS, 并删除 ATC_MCS 中所有包含 mcs 的 MCS。

算法 1. MCS 过滤算法

输入: 系统 DTC 集合

输出: 用于诊断的 MCS 集合

1. ATC := {激活的 DTC 集合};
2. UATC := {未激活的 DTC 集合};
3. ATC_MCS = {ATC 对应的 MCS 集合};
4. UACT_MCS = {UACT 对应的 MCS 集合};
5. FOR DTC in ATC_DTC
6. 将 DTC 对应的 MCS 集合加入 ATC_MCS;
7. END FOR
8. FOR DTC in UACT_DTC
9. 将 DTC 对应的 MCS 集合加入 UACT_MCS;
10. END FOR
11. FOR MCS1 in ACT_MCS
12. IF MCS1 在集合 UATC_MCS 中
13. 将 MCS1 从 ATC_MCS 中删除;
14. FOR MCS2 in ATC_MCS
15. IF MCS2 包含 MCS1
16. 将 MCS2 从 ACT_MCS 中删除;
17. END IF
18. END FOR
19. END IF
20. END FOR
21. SORTED_MCS = {ACT_MCS 中的 MCS 按 DIF 排序后的有序集合};
22. return SORTED_MCS;

通过 UDS 协议读取 ACT 集合和 UACT 集合后, 首先用算法 1 计算出按 DIF 排序的 MCS 集合, 然后可以按照 MCS 集合中 MCS 的顺序对系统进行故障诊断, 优先诊断 DIF 大的 MCS 和组件。故障诊断方法如下:

算法 2. 故障诊断算法

输入: 割序列集合 SORTED_MCS

输出: 系统状态

1. FOR MCS in SORTED_MCS
2. MCS = {将组件按 DIF 重新排序后的 MCS};
3. FOR c in MCS
4. IF c 诊断正常
5. 将包含 c 的 MCS 从 SORTED_MCS 中删除;
6. ELSE
7. 替换或修复 c;

8. END IF
9. END FOR
10. END FOR
11. ACT={重新读取系统故障码};
12. IF ACT 为空
13. return;
14. ELSE
15. 重新执行算法 1 和算法 2;
16. END IF

上面的故障诊断算法逐个诊断 MCS 集中的 MCS。当系统故障时, DIF 大的组件损坏的可能性更大, 所以 MCS 中 DIF 大的组件会被优先诊断。设当前诊断的组件为 c , 若 c 诊断结果正常, 说明所有包含 c 的 MCS 都不可能发生, 可以直接跳过这些 MCS 的诊断; 若 c 的诊断结果不正常, 诊断工程师需要修复或替换组件 c 。完成所有 MCS 的诊断后, 重新读取系统的 ATC 集合, 若 ATC 集合为空, 诊断流程结束; 若 ATC 集合不为空, 重复算法 1 和算法 2 直到系统恢复正常。算法执行过程中, 诊断系统可以持久化存储组件的诊断结果和 MCS, DIF 等数据以避免重复计算。

3 实例分析

本章以文献[17]中的主动后轮转向(active rear steering, ARS)系统为例, 对本文提出的方法进行验证。ARS 系统主要由转向操纵系统、中央控制器 ECU、电机控制系统、主动后轮转向机以及各类传感器单元组成。ARS

系统能够根据策略进行主动转向干预, 通过主动控制电机的转动方向以及角度, 实现可变传动比转向功能^[17]。ARS 系统可能会发生电机非指令型异常转动事件。电机异常转动严重可能会导致车辆失控, 情况严重时可能对驾驶员的生命安全造成威胁。

通过建立电机异常转动故障树, 系统工程师可以分析电机的各种失效模式并进行功能安全设计; 维修人员可以根据故障类型准确判断故障的位置和原因, 提高维修效率。将电机异常转动故障作为故障树的顶事件, 从顶事件开始自顶向下逐层分解, 直至分解到基本事件, 即可得到图 5 所示的故障树。导致顶事件发生的主要原因有输入信号异常、电机与控制器连接异常、电机驱动电路异常, 用或门将上述 3 种故障原因和顶事件连接, 表示发生上述任意一种异常都会导致顶事件发生。输入信号异常又可以分解为转子位置信号异常、转向机行程位移传感器异常、电机三相桥电流信号异常等故障原因。其中转子位置信号异常可能由位置传感器供电故障未检测或位置信号采集故障导致。电压检测模块通信故障和供电故障会造成传感器供电故障未检测事件, 用优先与门连接电压检测模块通信故障和供电故障, 表示由于电压检测模块通信失效在供电故障之前发生才会导致安全机制失效, 触发位置信号异常。位置信号采集传感器和备件位置信号采集传感器都失效会导致信号采集故障, 用备件门可以表示这种冗余安全设计。电机异常转动故障树的其余分解过程可参考图 5 自行推理。设当前系统工作时间为 10 000 h, 系统中各部件的寿命服从指数分布, 树中各节点标签的含义以及基本事件失效概率如表 1 所示。

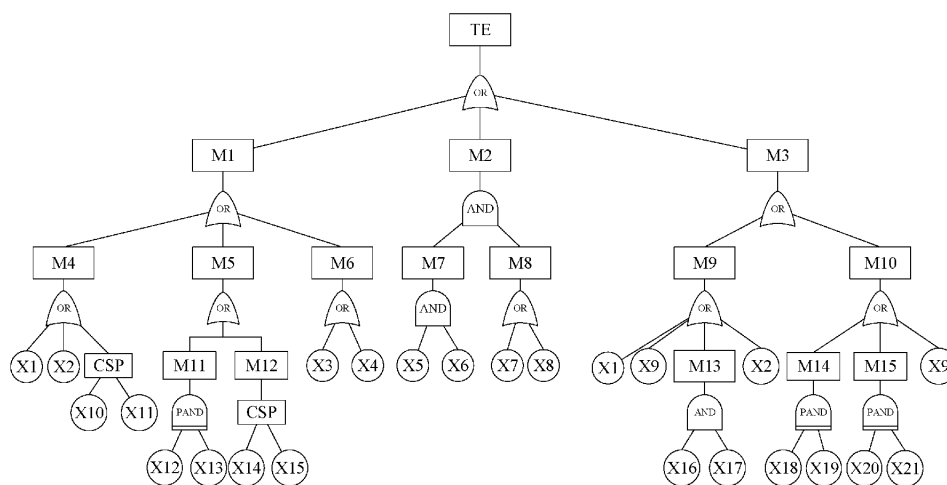


图 5 电机异常转动故障树

电机异常转动故障共定义了 6 个 DTC, DTC1 ~ DTC6 分别表示发生了 M2、M4、M5、M6、M9、M10 对应的事件。假设电机产生异常转动故障, 维修人员利用 UDS 协议从 ECU 中读取到激活的故障码 DTC1、DTC2、DTC6。通过读取的故障码可知, ARS 系统发生了故障

M2、M4、M10。

利用 2.2 节的方法计算已激活 DTC 对应的 MCS 集合 ACT_MCS 和未激活 DTC 对应的 MCS 集合 UACT_MCS 并使用算法 1 过滤部分 MCS 可得需要诊断的 MCS 集合 FILTERED_MCS, 计算结果如图 6 所示。

表 1 电机异常转动故障树各节点含义

节点标签	含义	失效概率
TE	电机异常转动	/
M1	输入信号异常	/
M2	电机与控制器连接异常	/
M3	电机驱动电路异常	/
M4	转向机行程位移传感器信号异常	/
M5	转子位置信号异常	/
M6	电机三相桥电流信号异常	/
M7	连接故障未探测	/
M8	ARS 执行电机故障	/
M9	三相桥预驱芯片故障	/
M10	三相桥故障且未探测	/
M11	位置传感器供电故障未检测	/
M12	转子位置信号采集故障	/
M13	电荷泵升压故障	/
M14	A 相断路故障	/
M15	A 相短路故障	/
X1	电源故障	5.417×10^{-5}
X2	SPI 通信故障	2.324×10^{-5}
X3	采样电阻故障	5.172×10^{-6}
X4	电路传感器故障	6.530×10^{-5}
X5	故障探测机制失效	2.784×10^{-5}
X6	控制器连接故障	3.189×10^{-5}
X7	三相桥间短路	1.579×10^{-5}
X8	三相桥间断路	3.309×10^{-5}
X9	过温故障	6.207×10^{-5}
X10	位移传感器 1 故障	6.391×10^{-6}
X11	位移传感器 2 故障	5.260×10^{-6}
X12	MCU 电压检测模块通信失效	8.107×10^{-5}
X13	传感器供电故障	4.842×10^{-6}
X14	位置采集电路 1 异常	6.541×10^{-5}
X15	位置采集电路 2 异常	6.541×10^{-5}
X16	升压不足欠压故障	5.474×10^{-5}
X17	欠压关闭故障	3.219×10^{-5}
X18	断路安全机制失效	5.864×10^{-5}
X19	高、低半桥断路故障	7.351×10^{-5}
X20	短路安全机制失效	4.923×10^{-5}
X21	高、低半桥短路故障	2.502×10^{-5}

将 FILTERED_MCS 中的割序列转换为 Markov 状态图并用式(6)计算出各 MCS 的发生概率,然后用式(4)~(6)计算 FILTERED_MCS 中各 MCS 的 DIF,并按 DIF 将 MCS 降序排序;用式(8)和(9)计算 MCS 中各基本事件的 DIF,并按 DIF 将各基本事件降序排序,计算结果如表 2 所示。

通过以上计算结果可知,MCS 过滤算法可以排除部分未发生的 MCS,避免了部分非必要诊断,减少了诊断的工

<i>ACT_MCS</i> :	<i>UACT_MCS</i> :	<i>FILTERED_MCS</i> :
{X1}	{X1}	{X10 → X10X11}
{X2}	{X12 → X13}	{X5, X6, X7}
{X10 → X10X11}	{X14 → X14X15}	{X5, X6, X8}
{X5, X6, X7}	{X3}	{X18 → X19}
{X5, X6, X8}	{X4}	{X20 → X21}
{X9}	{X1}	
{X18 → X19}	{X9}	
{X20 → X21}	{X16 → X17}	

图 6 MCS 集合计算结果

表 2 故障诊断 MCS 序列

最小割集	发生概率
{X18 → X19}	2.146×10^{-5}
{X10 → X10X11}	1.674×10^{-5}
{X20 → X21}	6.143×10^{-5}
{X6, X5, X7}	1.904×10^{-13}
{X6, X5, X8}	1.376×10^{-13}

作量;计算 MCS 和组件的 DIF 并按 DIF 大小顺序进行诊断,一定程度上避免了发生概率较低的 MCS 和故障率较小的组件的优先诊断。诊断工程师可以参考表 2 的故障诊断序列进行诊断,以减少诊断代价,提高诊断效率。

4 结 论

本文对汽车故障诊断问题进行研究,使用 DFT 建模汽车失效模式并求解 DFT 的 MCS 和 MCS 的诊断重要度,设计了一种适用于存在动态失效序列的汽车系统故障诊断方法。将 DTC 转换为 DFT,在此基础上求解诊断对象的故障诊断序列,优先诊断故障率较高的 MCS 和组件。实例验证结果表明,该方法可以减少不必要的组件诊断,提高诊断效率,对实际诊断工作有一定的指导意义。后续考虑基于本方法建立诊断数据库存储故障诊断序列,实现自动化部分电子元件,进一步提高故障诊断效率。

参考文献

- [1] HURDLE E E, BARTLETT L M, ANDREWS J D. System fault diagnostics using fault tree analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2007, 221(1): 43-55.
- [2] OLIVEIRA L, WEHRMEISTER M A, OLIVEIRA A. Systematic literature review on automotive diagnostics[C]. Computing Systems Engineering, IEEE, 2017:1-8.
- [3] SELIG M, SHI Z, BALL A, et al. A modern diagnostic approach for automobile systems condition monitoring[J]. Journal of Physics Conference, 2012, 364:012013.

- [4] RUIJTERS E, STOELINGA M. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools[J]. Computer Science Review, 2015, 15: 29-62.
- [5] 梁杰,饶天贵. 基于故障树的机车故障诊断系统设计[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(6): 328-333.
- [6] LIANG X L, CHEN T, YANG X D. Application of fuzzy fault tree analysis in the fault diagnosis for automobile engine system[C]. 2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), IEEE, 2017: 711-716.
- [7] ZHANG C, FANG W, ZHAO B, et al. Study on fault diagnosis method and application of automobile power supply based on fault tree-bayesian network[J]. Security and Communication Networks, 2022, DOI:10.1155/2022/4046966.
- [8] JAMES A T, GANDHI O P, DESHMUKH S G. Fault diagnosis of automobile systems using fault tree based on digraph modeling[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2018, 9(2): 494-508.
- [9] ASLANSEFAT K, KABIR S, GHERAIBIA Y, et al. Dynamic fault tree analysis: State-of-the-art in modeling, analysis, and tools [J]. Reliability Management and Engineering, 2020: 73-112.
- [10] 李佩昌,袁宏杰,兰杰,等. 基于顺序二元决策图的动态故障树分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(1): 167-175.
- [11] BRYANT R E. Binary decision diagrams [M]. Springer: Handbook of Model Checking, 2018.
- [12] TANG Z, DUGAN J B. Minimal cut set/sequence generation for dynamic fault trees [C]. Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-RAMS. IEEE, 2004: 207-213.
- [13] GE D, LIN M, YANG Y, et al. Quantitative analysis of dynamic fault trees using improved Sequential Binary Decision Diagrams[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 289-299.
- [14] 朱正福,李长福,何恩山,等. 基于马尔可夫链的动态故障树分析方法[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1104-1107.
- [15] DUTUIT Y, RAUZY A. Importance factors of coherent systems: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2014, 228(3): 313-323.
- [16] ISO 14229-1-2013, Road vehicles-unified diagnostic services(UDS)-Part 1 Specification and requirements: GB/T 42691. 1-2023. [S]. Standardization Administration of China, 2013.
- [17] 郑敏. 某轿车主动后轮转向系统转向电机控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

作者简介

钟志成, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车故障诊断技术。

E-mail: zhongzhicheng@mail.ustc.edu.cn

徐封杰, 硕士, 主要研究方向为嵌入式实时操作系统开发技术。

E-mail: fengjie.xu@outlook.com

方菱(通信作者), 副研究员, 博士, 主要研究方向为嵌入式系统安全与测试。

E-mail: fangl@hfcas.ac.cn