

采用动态故障树分析诊断系统故障的信息融合法

段荣行¹,董德存¹,赵时旻²

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 上海 201103)

摘要: 为提高系统故障诊断效率,提出了一种利用动态故障树分析诊断系统故障的信息融合法,该方法充分发挥动态故障树建模和贝叶斯网络推理各自优势,通过集成系统结构信息和传感器信息来诊断系统故障.采用高效的零压缩二元决策图生成系统所有最小割集,并采用贝叶斯网络方法计算部件和最小割集的诊断重要度;根据传感器证据信息对系统特征函数化简,同时对部件和证据条件下割集的诊断重要度进行更新;综合考虑部件和割集诊断重要度设计了系统诊断决策算法,生成诊断决策树以指导维修人员恢复系统故障;最后通过实例验证了该故障诊断方法的有效性.

关键词: 动态故障树; 离散时间贝叶斯网络; 诊断重要度; 期望诊断代价

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A

Information Fusion Method for System Fault Diagnosis Based on Dynamic Fault Tree Analysis

DUAN Rongxing¹, DONG Decun¹, ZHAO Shimin²

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Shentong Rail Transit Research and Consultancy Ltd. Co., Shanghai 201103, China)

Abstract: An information fusion method was proposed to diagnose system faults with dynamic fault tree (DFT) analysis to improve the efficiency of system diagnosis, which made full use of the advantages of both DFT for modeling and Bayesian networks (BN) for the inference ability and incorporated system structure information as well as sensors data into fault diagnosis. All minimal cut sets were generated via an efficient zero-suppressed binary decision diagram, while the diagnostic importance factor of components and minimal cut sets were calculated using BN. Furthermore, these reliability analysis results together with the characteristic function of the system were updated after receiving the evidence data from sensors

and used to develop diagnostic decision algorithm to optimize system diagnosis. Then, a diagnostic decision tree was generated to guide the maintenance crew to recover a system. Finally, an example was given to illustrate the efficiency of this method.

Key words: dynamic fault tree; discrete-time Bayesian network; diagnostic importance; the expected diagnosis cost

随着科学技术发展,系统的能力和现代化水平日益提高,系统规模越来越大,复杂性也越来越高.这类系统一旦发生故障,便会造成巨大损失.因此,寻求以最低代价和最少时间恢复系统正常工作状态的诊断与维修方案具有重要意义.故障诊断主要研究如何对系统中出现的故障进行检测、分离和辨识,即判断故障是否发生,定位故障发生的部位和确定故障幅值的大小.

为指导故障诊断步骤的合理排序,提高故障诊断效率,国内外学者提出了很多有效的理论和方法.文献[1]提出了将故障诊断方法分为定性分析方法和定量分析方法,并对这些方法作了详细的综述.定性分析方法可以不依赖大量的故障数据,同时可以充分利用产品设计时的定性和定量参数,且可进行自动诊断,非常适合于诊断大型复杂系统.文献[2]提出了基于熵减少的贪婪诊断算法,它以每次获得最大的信息量来选择下一步被诊断部件,并不是从整体最优上加以考虑,更没有利用系统结构信息,得出的往往是局部最优解.文献[3-4]采用启发式搜索的顺序测试方法来定位故障,不仅可以考虑测试代价,而且可以诊断多个故障,但这种方法需要构建故障字典,对于复杂大系统,用这种搜索方法所需的计算量非常大.针对上述方法的不足,文献[5-6]利

收稿日期: 2010-09-08

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z247); 国家自然科学基金资助项目(61074139)

第一作者: 段荣行(1977—),男,讲师,博士生,主要研究方向为智能故障诊断及系统可靠性. E-mail: ncu_ee@126.com

通讯作者: 董德存(1958—),男,教授,工学博士,博士生导师,主要研究方向为交通信息与控制. E-mail: ddc58@sohu.com

用故障树对系统可靠性进行分析,得出系统各部件诊断重要度,并以此为依据诊断系统故障.文献[7]通过故障树分析,提出故障判明效时比,按各部件的故障判明效时比来确定故障诊断的最优程序,但没有考虑系统割集.文献[8]综合考虑部件和最小割集的重要度来确定系统部件的诊断顺序,避免了概率小的最小割集优先诊断的情况,优化了诊断效率,然而这种故障诊断方法是基于静态逻辑或静态故障机理的,不适用于诊断动态随机性故障的系统. Assaf 等人在动态故障树分析基础上提出了一种融合传感器信息的故障诊断方法^[9],利用传感器信息减少被诊断的割集数量,但动态故障树的求解方法是基于马尔科夫链的,当诊断复杂系统时,不仅会导致系统状态空间爆炸,而且也没有推理能力,不能在获取故障证据信息时对部件故障概率进行更新,影响了系统故障诊断的精度和效率.综合以上研究,本文提出了一种利用动态故障树分析诊断系统故障的信息融合方法,以系统动态故障树为分析模型,将动态故障树转化成离散时间贝叶斯网络进行定量分析,不仅可以避免系统状态空间爆炸,而且可以在获取传感器信息后进行推理,更新部件和割集的诊断重要度,从而客观反映它们对系统故障的贡献程度;同时综合考虑部件和割集的诊断重要度设计了故障诊断算法,优化了诊断过程,以城市轨道交通微机控制直通电空控制系统为例验证了方法的有效性.

1 系统故障诊断方法

动态故障树是在静态故障树的基础上,通过引入功能相关门等动态逻辑门实现对系统动态故障行为描述,通过对动态故障树分析可以得出系统的最小割序/割集(统称为最小割集, minimal cut sets, MCS)和重要度,其中诊断重要度(diagnostic importance factor, DIF)是基于可靠性分析故障诊断方法的基石^[5],它从诊断的角度上对系统不同部件进行了区分,诊断重要度大的部件越重要,诊断时可综合考虑最小割集和部件的诊断重要度来进行决策.最小割集和部件诊断重要度的数学表达式为

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

式中: MCS_i 表示第 i 个最小割集; DIF_{MCS_i} 指第 i 个最小割集的诊断重要度; $P(MCS_i | S)$ 指系统发生故障时第 i 个最小割集发生故障的概率; c_i 是系统中第 i 个部件; DIF_{c_i} 是第 i 个部件 c_i 的诊断重要度;

$P(c_i | S)$ 是系统发生故障时第 i 个部件 c_i 发生故障的概率.

由于系统各部件的复杂程度不同,因而它们的测试费用也不同,为此引入了费用诊断重要度(cost and diagnostic importance factor, CDIF)^[6],其数学表达式为

$$CDIF_{c_i} = DIF_{c_i} / t_i \quad (2)$$

式中, t_i 表示第 i 个部件 c_i 的测试费用.

基于以上分析,提出了图1所示的系统故障诊断方法.首先通过演绎法建立系统动态故障树模型;然后对其进行定性和定量分析,定性分析求出系统所有最小割集,定量分析采用离散时间贝叶斯网络方法求部件和割集的诊断重要度,确定诊断传感器的位置,并由传感器获得的证据信息对最小割集和部件诊断重要度进行更新;最后综合考虑割集诊断重要度和部件 CDIF 确定系统诊断算法,生成相应的诊断决策树(diagnostic decision tree, DDT).

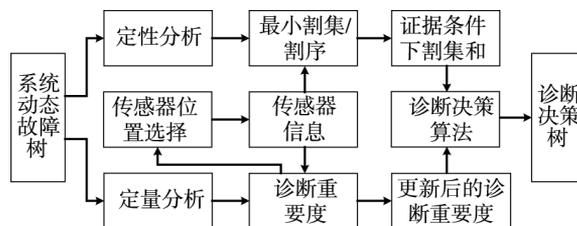


图1 系统故障诊断方法

Fig.1 System fault diagnosis method

2 动态故障树分析

2.1 动态故障树定性分析

行列法和代数化简法是求解最小割集最有效的方法,但不适合于动态故障树求解.基于零压缩二元决策图(zero-suppressed binary decision diagram, ZBDD)的最小割集生成方法^[10]分离了动态逻辑门的时序属性与逻辑属性,可以在先不考虑时序约束的情况下把动态故障树转化为静态故障树,利用基本集合运算对故障树进行深度优先、从左至右遍历,递归执行直至最顶层门结构,可得静态故障树的最小割集,再把静态故障树中的最小割集概念拓展到动态故障树中的最小顺序割集.最小割集描述了系统结构方面的信息,将所有最小割集和定义为系统特征函数.

2.2 动态故障树定量分析

动态故障树定量分析主要计算最小割集诊断重

要度和各部件诊断重要度.文献[11]采用马尔科夫状态转移链的方法来分析动态故障树,先求出部件的边缘重要度,再利用边缘重要度和诊断重要度的关系得到部件诊断重要度的近似值,计算过程复杂,而且会在系统庞大时导致状态空间爆炸,并且不能在获取证据信息时进行推理.故本文提出了将动态故障树转化为离散时间贝叶斯网络(discrete-time Bayesian network,DTBN)的方法计算诊断重要度,DTBN是在贝叶斯网络基础上增加了一个时间变量,逻辑门转化为DTBN的方法可参考文献[12-13].

动态故障树转化成了DTBN后,借助于Matlab贝叶斯网络开源工具BNT(Bayes net toolbox)计算各部件诊断重要度,并可以在获取证据信息后对它进行更新.输入系统故障证据 $P(S = k + 1) = 0$ 和 $P(S = \alpha) = 1/k, 1 \leq \alpha < k + 1$,利用BNT的团树推理算法进行后向推理即可求得部件在系统失效时部件 c_i 正常的概率为 $P_{c_i}(\alpha = k + 1)$,从而得出它的诊断重要度为

$$DIF_{c_i} = 1 - P_{c_i}(\alpha = k + 1) \quad (3)$$

最小割集的诊断重要度可求得如下:

$$DIF_{MCS_i} = P(MCS_i) / P(S) \quad (4)$$

式中: $P(MCS_i)$ 为第 i 个最小割集发生故障的概率; $P(S)$ 为系统发生故障的概率.

2.3 集成传感器信息

系统故障时一般会伴随一些故障证据信息,将这些信息用于诊断可以提高故障诊断效率.故障证据信息可通过诊断传感器获取,而传感器位置的选择显得尤为重要.传统传感器设置点选择的方法是基于信息熵的,信息熵大的部件作为传感器的设置点.诊断重要度从诊断的角度对不同部件进行了区分,诊断重要度越大的部件越重要,故可以它作为传感器位置选择的标准,将传感器设置在证据信息函数值大的部件上.设传感器 S 同时监测部件 C 和 D ,逻辑关系为与,证据信息函数可以表示为

$$E = DIF_C \cdot DIF_D \quad (5)$$

获取证据信息后,一方面对系统特征函数进行化简以减少被诊断的割集数,将更新后的系统特征函数定义为证据条件下的割集(cut sets under evidence, CUE),假设一个系统的特征函数为

$$F = AB + AD + BC + CD + DE \quad (6)$$

式中, A 和 B 为部件.

传感器 S 同时监测部件 C 和 D ,并检测到 C 和 D 都出现故障,则证据条件下的割集为

$$F_{cue} = A + B + E \quad (7)$$

另一方面利用贝叶斯定理对部件和割集的诊断重要度进行更新,以实时反映它们对系统故障的贡献程度.

3 诊断决策算法

由于证据条件下割集的每一项对应系统故障的一种模式,因此故障诊断时可通过逐个测试证据条件下割集来定位故障源.所以系统故障诊断是以证据条件下割集为单位,只有当一个证据条件下割集诊断完后才能诊断下一个割集.割集的诊断顺序由割集的诊断重要度来决定,诊断重要度大的割集优先诊断,而同一割集里部件的诊断顺序由其费用诊断重要度来确定,费用诊断重要度大的部件先诊断.综合考虑证据条件下割集的诊断重要度和部件的费用诊断重要度,诊断决策算法如下^[8]:

步骤1:列出系统所有证据条件下割集并按诊断重要度从大到小排列;

步骤2:选择诊断重要度最大的证据条件下割集,并诊断其费用诊断重要度最大的部件 N ;

步骤3:将所有证据条件下割集分为2部分,一部分包含部件 N ,另一部分不包含部件 N ;

3.1 假如部件 N 诊断为故障,则诊断所有含 N 的证据条件下割集

(1) 诊断所有证据条件割集,诊断重要度大的证据条件下割集优先诊断;

(2) 在诊断同一证据条件下割集时,费用诊断重要度大的部件优先诊断;

3.2 如果部件 N 诊断为正常,则诊断所有不含 N 的证据条件下割集

(1) 在未诊断的证据条件下割集中,选定诊断重要度最大的割集;

(2) 重复执行步骤2和步骤3.

上面诊断决策算法可以用诊断决策树的形式来表示,诊断决策树是一个有向无环图,由结点和有向弧组成^[5,11].结点表示正在诊断的部件,有向弧指向下一个被诊断的部件,右弧表示被诊断的部件故障,其指向与父结点同一割集的其他部件,左弧表示被诊断的部件正常,所有包含该结点的割集都不会发生,无需诊断这些割集;左弧指向与父结点不在同一割集的部件.如果某部件被诊断为故障则应进行维修,当割集里所有部件维修后都要检查系统是否恢复正常,如果系统仍然故障则转向下一个割集进行诊断,直到系统恢复正常.确定了割集和部件的诊断

顺序,可以很容易画出诊断决策树.

4 系统故障诊断评价指标

系统诊断方法是否优越通常用以下两个指标来衡量:诊断准确度和诊断代价.诊断准确度可用系统诊断完成时,被诊断单元的平均数来量化,被诊断单元平均数越小,则系统诊断准确度越高.而诊断代价主要包括诊断时间和诊断费用,诊断代价越低说明系统诊断方法越好.由于系统故障诊断结果是以诊断决策树的形式来描述,因此评价诊断算法的好坏可以从评价相应诊断决策树入手.传统评价决策树方法有决策树平均深度^[14]和期望代价函数^[15],在一定程度上它们分别对应于诊断准确度和诊断代价.然而这些方法都仅仅考虑部件的测试费用和失效概率,忽略了系统的定性结构和部件的诊断重要度,因此评价并不客观.因为系统故障的原因是系统某个最小割集发生了故障,所以故障诊断评价指标应从最小割集的故障概率入手,而不能像前面两种方法那样采用决策树路径的故障概率.为客观评价系统故障诊断方法,综合考虑系统的定性和定量信息,提出了期望诊断代价函数(expected diagnosis cost, EDC),它是指排除系统故障时,所采用的诊断与维修所产生代价的期望值,其表达式为

$$EDC = \sum_{i=1}^n \text{DIF}_{\text{MCS}_i} \cdot c_{p_i}, \quad c_{p_i} = \sum_{j=1}^{m_i} t_j \quad (8)$$

式中: c_{p_i} 为决策树第*i*条路径的测试费用; m_i 为决策树第*i*条路径包含的所有结点个数; t_j 为结点 c_j 的测试费用.

期望诊断代价函数考虑了部件故障和系统故障之间的联系,兼顾了诊断准确度和诊断代价,评价指标更客观,而且计算也简单.期望诊断代价函数值越小说明系统故障诊断方法越优越.

5 实例分析

微机控制直通电空制动系统已成为城市轨道交通车辆制动系统的首选,它具有反应迅速、操纵灵活、能与电制动混合使用和防滑控制等功能,是一个机电结合的控制系统,其功能由电路和气路两部分协调完成,而且这两部分各自成系统,同时又存在较大的耦合度,逻辑关系错综复杂.国内对微机控制直通电空制动系统的研究仅局限于对其进行可靠性分析,采用可靠性框图或静态故障树计算其定量指

标^[16-17],得出对系统可靠性造成影响的薄弱环节,进而提出合理的改进方案,而对其故障诊断方法鲜有研究.本文采用动态故障树为分析模型,可以考虑系统故障的动态属性,不仅能得出系统定性和定量指标,而且能在系统故障时快速、准确地定位故障原因,尽快使系统恢复正常.

某微机控制直通电空制动系统常用制动失效的动态故障树见图 2^[17],假设所有部件均服从指数分布,按前面的方法设置诊断传感器,它同时监测部件 X_{18} 和 X_{19} ,并假设它监测到了部件 X_{18} 和 X_{19} 都发生故障.采用 ZBDD 的方法对动态故障树进行定性分析,利用证据信息对所有最小割集进行化简,求出证据条件下的割集;将此动态故障树转换成相应的 DTBN,输入相关证据信息,借助于贝叶斯网络强大的推理功能进行定量分析,求出证据条件下割集和部件的诊断重要度,详细诊断数据见表 1.对割集按照诊断重要度的大小进行排序,诊断重要度大的割集优先诊断;对同一割集的不同部件根据其费用诊断重要度的大小来进行诊断,费用诊断重要度大的部件优先诊断.为简化计算,假设所有部件的测试费用为 1,结合前面的诊断决策算法,可以得出常用制动失效的诊断决策树如图 3,显然,加入传感器信息后,诊断决策树明显减小.用式(8)计算不同诊断算法的期望诊断代价值,文献[8]和[9]方法对应的期望诊断代价值分别为 3.562 和 2.586,而用本文方法得出的期望诊断代价值为 1.918,其诊断效率最高.

6 结论

采用动态故障树分析诊断系统故障的信息融合方法以系统动态故障树为分析模型,基于 ZBDD 的定性分析方法求出所有最小割集,基于 DTBN 的定量分析方法求出割集和部件的诊断重要度,通过集成传感器信息对系统特征函数进行化简,减少被诊断的割集数;同时利用贝叶斯网络的推理能力在获取证据信息后对割集和部件的诊断重要度进行更新,并以此为依据设计系统故障诊断算法,兼顾了发生概率大的割集诊断优先性与包含诊断重要度大的部件的割集的诊断优先性,一定程度上避免了发生概率小的割集优先诊断的情况,提高了系统诊断效率.该方法充分发挥了动态故障树和贝叶斯网络各自的优势,能快速、准确诊断系统故障原因,节省诊断成本,优化系统诊断过程.

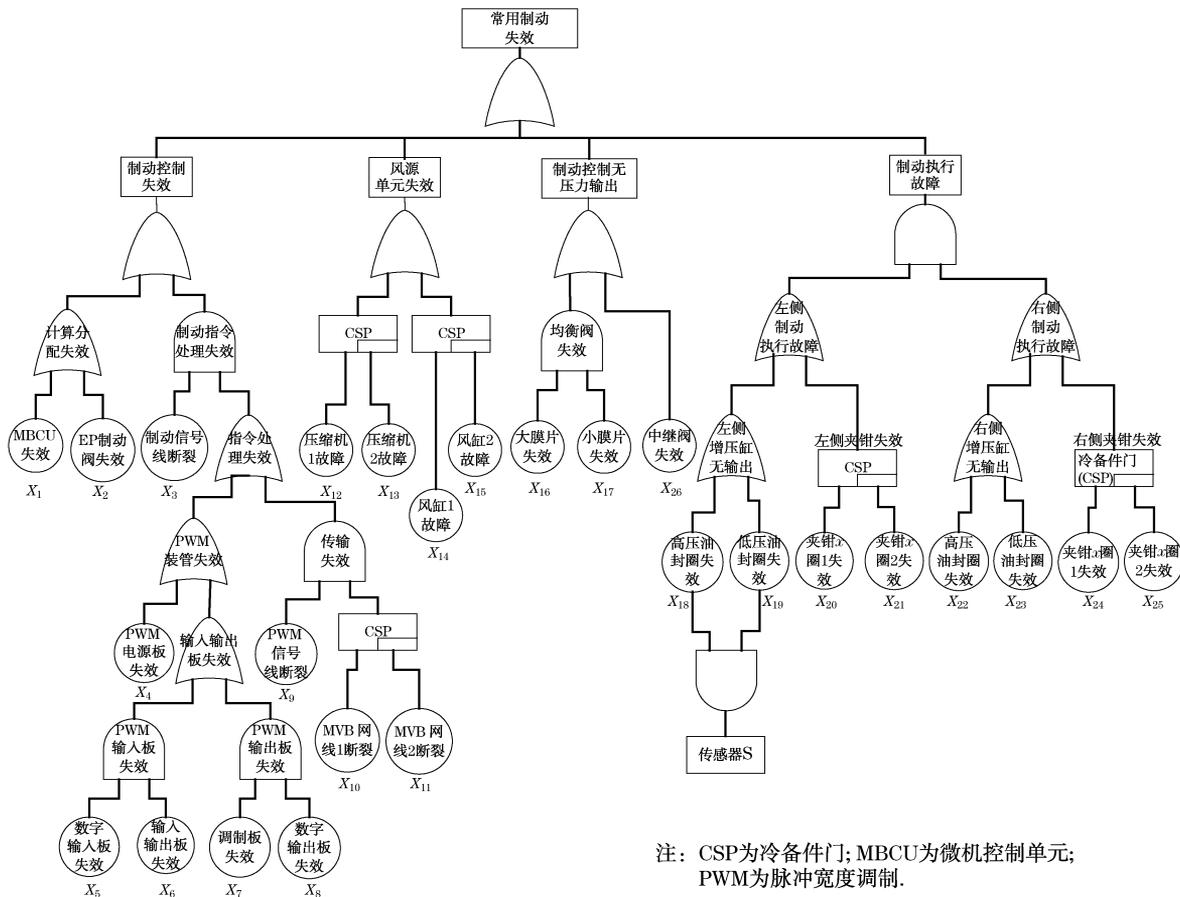


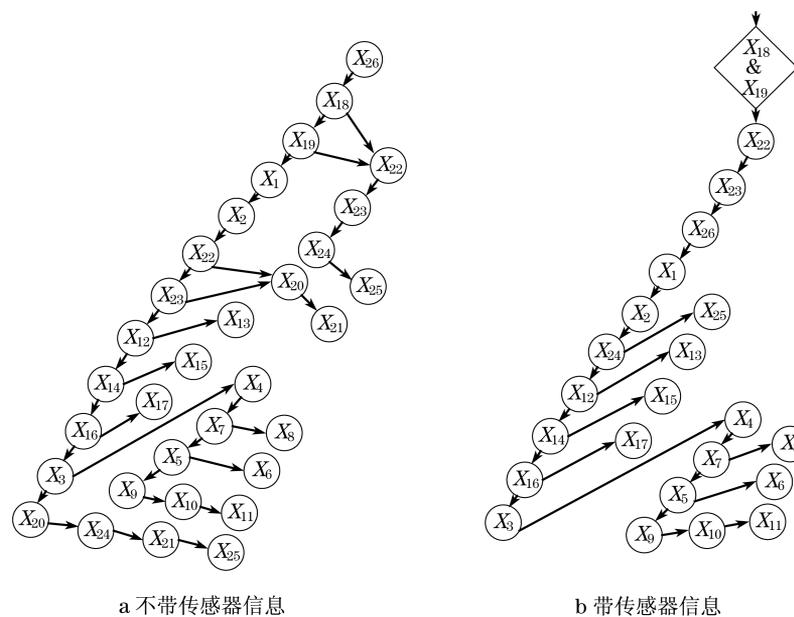
图 2 微机控制直通电空制动系统常用制动失效动态故障树

Fig.2 A dynamic fault tree for service braking failure of braking system

表 1 微机控制直通电空制动系统常用制动失效故障诊断数据

Tab.1 Detailed diagnostic data for the service braking failure

部件	部件 DIF	证据下部件 DIF	部件	部件 DIF	证据下部件 DIF	证据下割集	证据下割集 DIF
X ₁₈	3.24 × 10 ⁻¹	1	X ₁₄	1.47 × 10 ⁻²	1.41 × 10 ⁻²	X ₂₃	4.65 × 10 ⁻¹
X ₁₉	3.24 × 10 ⁻¹	1	X ₂₁	4.80 × 10 ⁻³	1.37 × 10 ⁻³	X ₂₂	4.65 × 10 ⁻¹
X ₂₂	3.24 × 10 ⁻¹	4.65 × 10 ⁻¹	X ₂₅	4.80 × 10 ⁻³	6.93 × 10 ⁻³	X ₂₆	7.86 × 10 ⁻²
X ₂₃	3.24 × 10 ⁻¹	4.65 × 10 ⁻¹	X ₆	2.00 × 10 ⁻³	2.00 × 10 ⁻³	X ₁	3.54 × 10 ⁻²
X ₂₆	2.78 × 10 ⁻¹	7.86 × 10 ⁻²	X ₃	1.55 × 10 ⁻³	1.53 × 10 ⁻³	X ₂	1.62 × 10 ⁻²
X ₁	1.25 × 10 ⁻¹	3.54 × 10 ⁻²	X ₉	1.52 × 10 ⁻³	1.52 × 10 ⁻³	X ₂₄ , X ₂₅	6.93 × 10 ⁻³
X ₂₀	7.64 × 10 ⁻²	7.32 × 10 ⁻²	X ₁₀	1.52 × 10 ⁻³	1.52 × 10 ⁻³	X ₁₂ , X ₁₃	3.78 × 10 ⁻⁴
X ₂₄	7.64 × 10 ⁻²	7.84 × 10 ⁻²	X ₁₆	1.39 × 10 ⁻³	1.37 × 10 ⁻³	X ₁₄ , X ₁₅	2.47 × 10 ⁻⁴
X ₂	5.74 × 10 ⁻²	1.62 × 10 ⁻²	X ₁₇	1.39 × 10 ⁻³	1.37 × 10 ⁻³	X ₁₆ , X ₁₇	9.33 × 10 ⁻⁶
X ₅	2.70 × 10 ⁻²	2.76 × 10 ⁻²	X ₁₃	1.34 × 10 ⁻³	3.80 × 10 ⁻⁴	X ₃ , X ₄	6.11 × 10 ⁻⁶
X ₇	2.17 × 10 ⁻²	2.17 × 10 ⁻²	X ₁₅	8.74 × 10 ⁻⁴	2.47 × 10 ⁻⁴	X ₃ , X ₇ , X ₈	1.54 × 10 ⁻⁶
X ₁₂	1.85 × 10 ⁻²	1.75 × 10 ⁻²	X ₄	8.20 × 10 ⁻⁴	8.00 × 10 ⁻⁴	X ₃ , X ₅ , X ₆	2.22 × 10 ⁻⁷
X ₈	1.77 × 10 ⁻²	1.76 × 10 ⁻²	X ₁₁	5.78 × 10 ⁻⁷	5.78 × 10 ⁻⁷	X ₃ , X ₉ , X ₁₀ , X ₁₁	3.53 × 10 ⁻¹²



a 不带传感器信息

b 带传感器信息

图 3 常用制动失效诊断决策树

Fig. 3 Diagnostic decision tree for service braking failure of braking system

参考文献:

- [1] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748.
ZHOU Donghua, HU Yanyan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 748.
- [2] Moret B M. Decision trees and diagrams [J]. Computing Surveys, 1982, 14(4): 593.
- [3] Pattipati K R, Alexandridis M G. Application of heuristic search and information theory to sequential diagnosis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1990, 20(4): 872.
- [4] Shakeri M, Raghavan V, Pattipati K R, et al. Sequential testing algorithms for multiple fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2000, 30(1): 1.
- [5] Assaf T, Dugan J B. Automatic generation of diagnostic expert systems from fault trees [C] // Annual Reliability and Maintainability Symposium. Los Angeles: IEEE Reliability Society, 2003: 143 - 147.
- [6] Assaf T, Dugan J B. Design for diagnosis using a diagnostic evaluation measure [J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2006, 4: 37.
- [7] 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.
NI Shaoxu, ZHANG Yufang, YI Hong, et al. Intelligent fault diagnosis method based on fault tree[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(8): 1372.
- [8] 陶勇剑, 董德存, 任鹏. 采用故障树分析诊断系统故障的改进方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 143.
TAO Yongjian, DONG Decun, REN Peng. An improved method for system fault diagnosis using fault tree analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 143.
- [9] Assaf T, Dugan J B. Diagnosis based on reliability analysis using monitors and sensors[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(4): 509.
- [10] TANG Zhihua, Dugan J B. Minimal cut set/sequence generation for dynamic fault trees [C] // Annual Reliability and Maintainability Symposium on product Quality and Integrity. Los Angeles: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004: 207 - 213.
- [11] Assaf T, Dugan J B. Build better diagnostic decision trees[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2005, 8: 48.
- [12] Boudali H, Dugan J B. A discrete-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 87(3): 337.
- [13] DUAN Rongxing, WAN Guochun, DONG Decun. A new assessment method for system reliability based on dynamic fault tree[C] // 3rd Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: IEEE Computer Society, 2010: 219 - 222.
- [14] Tong D W, Jolly C H, Zalondek K C. Diagnostic tree design with model based reasoning [C] // IEEE Automatic Testing Conference. Philadelphia: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 1989: 161 - 167.
- [15] Koutsoukos X, Zha F, Haussecker H, et al. Fault modeling for monitoring and diagnosis of sensor-rich hybrid system[C] // 40th IEEE conference on decision and control. Orlando: IEEE, 2001: 793 - 801.
- [16] 吴萌岭, 王孝延, 裴玉春, 等. 微机控制直通电空制动系统可靠性模型初探[J]. 铁道车辆, 2006, 44(3): 20.
WU Mengling, WANG Xiaoyan, PEI Yuchun, et al. Discussion of the reliability model of the micro-computer controlled straight electro-pneumatic braking system[J]. Rolling Stock, 2006, 44(3): 20.
- [17] 金碧筠. 轨道交通制动系统可靠性研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2009.
JIN Biyun. Study on reliability of mass transit braking system [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2009.