

基于因果图最小割集和最小径集在故障系统中的诊断

彭霜霜, 王洪春

(重庆师范大学数学学院, 重庆 401331)

[摘要] 因果图主要用于故障诊断和故障分析, 运用因果图模型的原理和方法, 对基于因果图最小割集和最小径集的定量故障诊断方法进行研究, 并给出飞行器发动机滑动压力指示警告系统的诊断实例, 为系统故障源的查找提出简洁有效的方法. 首先将因果图转换成果树, 再定义最小割集和最小径集, 最后结合实例给出诊断方案步骤.

[关键词] 因果图, 故障诊断, 最小割集, 最小径集

[中图分类号] TP39 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)03-0060-04

A Diagnosis Approach Based on Minimal Cut Sets and Minimal Path Sets of Causality Diagram

Peng Shuangshuang, Wang Hongchun

(College of Mathematics, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Causality diagram is mainly used for fault diagnosis and fault analysis. The paper, by using the principles and methods of causal graph models conducts a quantitative research on minimal cut sets and minimal path sets fault diagnosis method based on causal diagram, and gives instruction in aircraft engines sliding pressure warning system diagnosis example, and proposes a simple and effective method to find the source failure of the proposed system is. Firstly, the causality diagram is converted into a causality tree, then the minimal cut sets and minimal path sets are defined, and finally the steps of the diagnostic programs are given by combining examples.

Key words: causality diagram, fault diagnosis, minimal cut sets, minimal path sets

复杂系统的故障诊断是人工智能技术应用于实际问题的重要领域之一. 研究能够切实保障现代工业复杂系统安全可靠地运行, 并且在出现问题后能及时有效地定位故障源, 显得尤为重要. 故障诊断方法包括贝叶斯网络法^[1]、故障树分析法^[2]、因果图法^[3-7]等. 而在因果图对故障诊断中, 基于基本事件重要度的故障分析^[3-5]、基于模糊因果图在故障中的诊断^[6-8]都缺乏对因果图中每个事件最小割集和最小径集故障的分析, 为了实现故障系统的快速诊断, 本文结合某飞行器发动机滑动压力指示警告系统的实际故障以及因果图原理, 给出基于因果图的最小割集和最小径集对故障事件的诊断方案.

1 基于因果图的知识表达

因果图方法是在信度网基础上发展的, 1994年, 张勤教授^[9]提出的一种基于概率分析、图论的对不确定知识的表达和推理模型, 采用图形直观表示因果关系、结点(圆圈节点、方框节点、门节点)表示事件或变量、有向连接边表示因果关系. 另外连接强度表示因果关系强度, 而不用条件概率表示, 图1即为典型因果图. 该方法引入了布尔逻辑运用, 对网络的拓扑结构没有限制(不需要通常使用的DAG图).

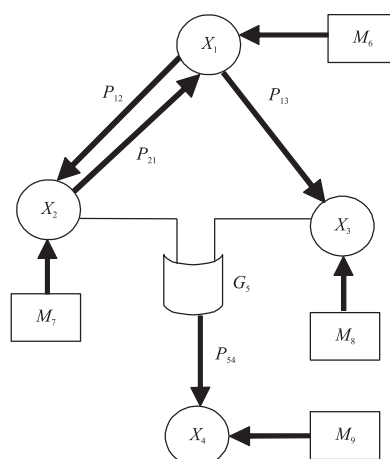


图1 典型因果图

Fig.1 Typical causality diagram

收稿日期: 2014-10-16.

基金项目: 国家社科基金(13BTJ008)、重庆高校创新团队建设计划资助项目(KJTD201308).

通讯联系人: 王洪春, 博士, 教授, 研究方向: 人工智能, 因果图推理等. E-mail: wang-hongchun@tom.com

2 基于最小割集和最小径集的知识描述

定义1 割集 (CS) 是一组事件 (包括基本事件、节点事件、连结事件、门事件) 以及逻辑与的关系组合. 仅有基本事件表达的割集叫做最终割集 (CSs - f).

定义2 在最终割集中, 如果去掉其中任意一个基本事件后, 就不是割集, 则这几个基本事件所组成的割集即为最小割 (MCS).

定义3 因果图中某几个事件同时不发生时中间事件也不会发生, 这几个事件所组成的集合即为径集 (PS).

定义4 在任意径集中, 如果去掉其中任意一个基本事件, 将引起中间事件的发生, 则称这个径集为最小径集 (MPS). 最小径集反映的是某中间事件不发生所采取的措施.

为了推理计算的简化, 在利用因果图进行故障诊断时, 常将原因果图转化成以中间事件为树根 (将此时的中间事件令为顶事件), 基本事件为树叶, 用逻辑门串联的因果树, 若因果图中存在有向环路, 则需利用解环规则进行解环. 如图2即为图1不同节点的因果树.

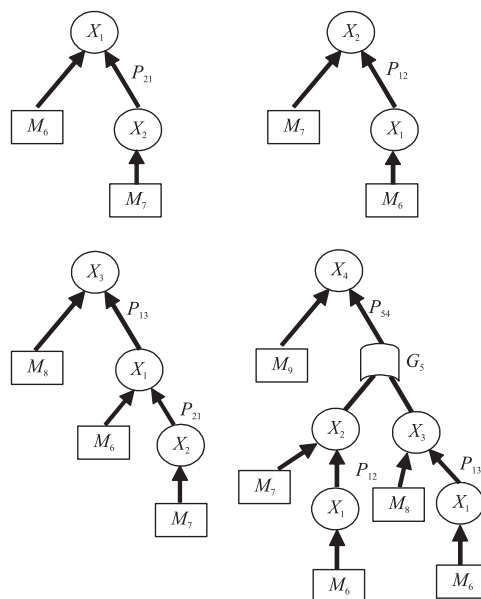


图2 逻辑解环后的因果树

Fig.2 Cause-consequence tree after logic power network

3 基于最小割集和最小径集的推理诊断

根据因果图模型中部分基本事件的状态信息, 利用最小割集和最小径集原理, 当因果图中顶事件发生故障时, 可进行如下推理诊断步骤:

(1) 确立因果图发生故障的顶事件;

(2) 根据因果图基本事件的工作状态, 将其分为4个集合正常基本事件 NE 、故障基本事件集 FE 、未知基本事件集 UE 和可能故障基本事件 PFE ;

(3) 从正常基本事件集 NE 集合中依次取正常事件, 结合最小径集对未知基本事件 UE 进行查看, 若某个含有 n 个基本事件的最小径集, 有 $n-1$ 个正常事件, 则另外一个即为故障基本事件, 将其放入故障基本事件集 FE 中; 若含有的正常基本事件小于 $n-1$ 个, 则将其余的基本事件放入可能故障基本事件 PFE ;

(4) 由正常基本集 NE 结合最小割集的原理, 对最小割集的逻辑或分支进行剪枝, 将不使得顶事件失效的割集剪掉, 即将正常事件的最小割集分支剪掉, 缩小诊断范围;

(5) 对进行上一步后的最小割集进行最后判断. 若最小割集逻辑或下的分支只剩下一个割集, 则将此割集中的基本事件放入故障基本事件集, 且此最小割集基本事件即为导致顶事件失效的故障源; 若剩下的并非一个最小割集, 则根据基本事件对顶事件发生所作贡献的大小依次作为故障源怀疑对象, 进一步查找故障源;

(6) 若还有故障现象没有诊断, 则转回(3);

(7) 若找到了所有故障原因, 则诊断成功, 并进行相应的维修, 否则, 即为故障诊断失败.

通过以上因果图理论的研究, 可看出利用因果图最小割集和最小径集查找故障源, 可清晰地看出顶事件与子系统的状态关系, 全面查清引起系统故障发生的原因和位置.

4 故障分析

以某飞行器发动机滑油压力指示警告系统图3为例, 利用因果

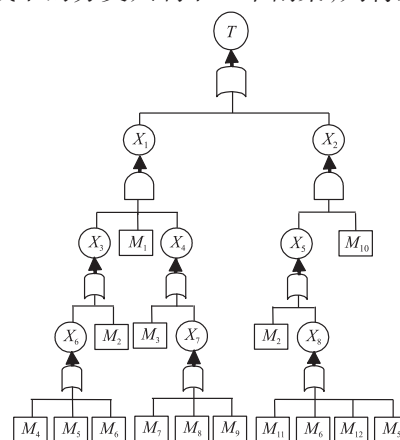






图3 发动机滑油压力指示警告系统因果树

Fig.3 Engine oil pressure indicator warning system because fruit

图最小割集和最小径集进行故障定位排查整修.

表 1 为飞行器发动机滑油压力指示警告系统因果事件表,图 4 为已进行逻辑解环后的发动机损坏为顶事件的因果树.

表 1 发动机滑油压力指示警告系统因果事件表
Table 1 Engine oil pressure warning system indicating the causal event table

符号	含义	符号	含义
T	发动机损坏	M_5	电源组件 2 故障
X_1	滑油压力过低而引起发动机损坏	M_6	警告灯故障
X_2	滑油滤堵塞而引起发动机损坏	M_7	压力表故障
X_3	滑油压力低于 0.25 MPa 时灯不亮	M_8	传感器故障
X_4	滑油压力指示故障	M_9	电源组件 1 故障
X_5	滑油压力大于 0.35 MPa 时灯不亮	M_{10}	滑油滤堵塞
X_6	滑油压力警告系统低限压力部分故障	M_{11}	滑油滤压差电门故障
X_7	滑油压力指示系统故障	M_{12}	滑油导管等组件故障
X_8	滑油压力警告系统压差部分故障		或门
M_1	发动机滑油系统压力过低		与门
M_2	电源 2 故障		节点事件
M_3	电源 1 故障		基本事件
M_4	滑油低压电门故障		

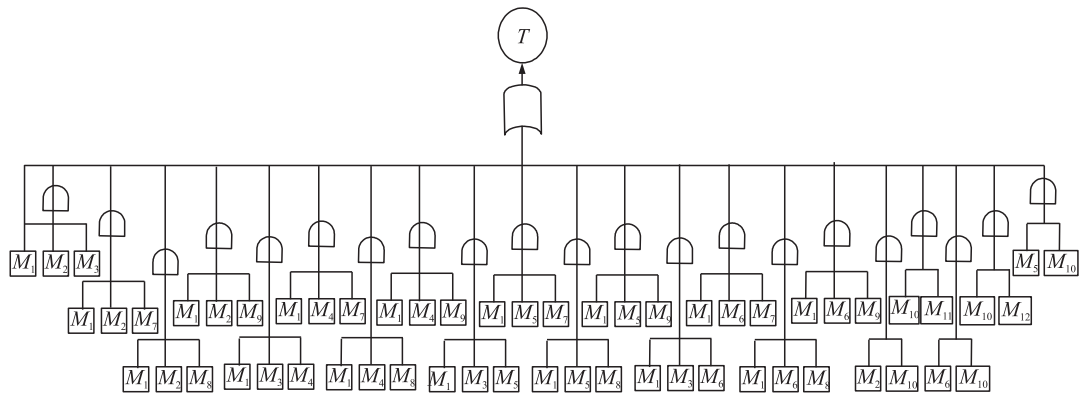


图 4 逻辑解环后以发动机损坏为顶事件的因果树

Fig.4 The logical solution ring with engine damage as a result of the top events of fruit trees

根据因果树可得结构函数为:

$$\begin{aligned} T &= X_1 + X_2, \\ M_1 &= X_3 \cdot X_4 \cdot M_1, \\ M_2 &= X_5 \cdot M_{10}, \\ M_3 &= M_2 + X_6, \\ M_4 &= M_3 + X_7, \\ M_5 &= M_2 + X_8, \\ M_6 &= M_4 + M_5 + M_6, \\ M_7 &= M_7 + M_8 + M_9, \\ M_8 &= M_{11} + M_6 + M_{12} + M_5. \end{aligned}$$

利用最小割集与最小径集之间的关系,通过求顶事件的逆事件的最终割集求出的最小径集如下:

$$\begin{aligned} &\{M_1, M_{10}\}, \\ &\{M_2, M_4, M_5, M_6, M_{10}\}, \\ &\{M_3, M_7, M_8, M_9, M_{10}\}, \\ &\{M_2, M_4, M_5, M_6, M_{11}, M_{12}\}, \\ &\{M_3, M_7, M_8, M_9, M_2, M_{11}, M_6, M_{12}, M_5\}. \end{aligned}$$

在判断过程中,若顶事件故障发生,根据步骤(2)到(7),立即将已经测到的基本事件分为:正常基本事件集 NE 、故障基本事件集 FE 、未知基本事件集 UE 和可能故障基本事件 PFE ,然后根据已经求得的最小径集进行排查,对最小割集等价状态进行剪枝,最终得出发生故障的较小范围或者直接得出故障源. 针对飞行器发动机滑油压力指示警告系统事件,若在某次测试中,已知正常基本事件 $NE=\{M_3, M_7, M_8, M_9, M_{11}, M_6, M_5\}$,故障基本事件集 $FE=\{M_2\}$,其余的基本事件故障与否不能确定,则根据最小割集与最小径集规则,可以判定 M_{10} 必然发生故障,故将 M_{10} 放到故障基本事件集, $FE=\{M_2, M_{10}\}$,仍不能确定的基本事件 M_1, M_4, M_{12} 加入到可能基本事件集 PFE ,即 $PFE=\{M_1, M_4, M_{12}\}$,因此可判断发动机损坏失效的故障源为 $\{M_2, M_{10}\}$,而对 $PFE=\{M_1, M_4, M_{12}\}$ 中的基本事件,可根据基本事件重要度进行排查维修.

5 结语

基于因果图最小割集和最小径集的故障诊断,可减少了对故障诊断的定量分析,避免复杂数据计算,对某个故障系统进行快速定位,找出故障源,缩短排查故障时间. 由于因果图在故障诊断系统中的应用已经很成熟,而最小割集和最小径集的诊断应用还不够广泛,对于第2节的推理诊断过程,由于系统的因果图已经建立,可快速求出各个子系统的最小割集与最小径集表示的等价因果图,进行剪枝措施,使因果图更加简化,以达到快速诊断出导致顶事件失效的故障源.

[参考文献](References)

- [1] 傅军,贺伟,阎建国,等. 贝叶斯网络在柴油机动力装置故障诊断中的应用[J]. 上海海运学院学报,2001,22(3):68-72.
Fu Jun, He Wei, Yan Jianguo, et al. A study of fault diagnosis based on Bayesian networks[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2001, 22(3):68-72.(in Chinese)
- [2] 朱大奇,于盛林. 基于故障树最小割集的故障诊断方法研究[J]. 数据采集与处理,2000,17(3):341-344.
Zhu Daqi, Yu Shenglin. Diagnosis approach based on minimal cut sets of fault trees[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2002, 17(3):341-344.(in Chinese)
- [3] 梁新元. 基于因果图基本事件重要度的故障分析方法研究[J]. 微电子学与计算机,2004,21(11):122-123.
Liang Xinyuan. Study on diagnosis approach based on basic event importance of causality diagram[J]. Microelectronics & Computer, 2004, 21(11):122-123.(in Chinese)
- [4] 梁新元,张勤. 基于因果图故障模式重要度的分析方法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2004,27(8):75-78.
Liang Xinyuan, Zhang Qin. Diagnosis approach based on failure mode importance of causality diagram[J]. Journal of Chongqing University: Nature Science Edition, 2004, 27(8):75-78.(in Chinese)
- [5] 梁新元. 因果图在重大安全事故分析中的应用[J]. 计算机工程,2005,31(13):174-175.
Liang Xinyuan. Application of causality diagram in major safety accident analysis[J]. Computer Engineering, 2005, 31(13):174-175.(in Chinese)
- [6] 王洪春. 模糊因果图及在压力容器故障诊断中的应用[J]. 计算机应用,2005,25(1):199-201.
Wang Hongchun. Fuzzy causality diagram and application in fault diagnosis of pressure vessels[J]. Computer Applications, 2005, 25(1):199-201.(in Chinese)
- [7] 王洪春,张勤. 基于模糊因果图的故障诊断[J]. 微电子学与计算机,2005,22(6):109-112.
Wang Hongchun, Zhang Qin. Fault diagnosis based on the fuzzy causality diagram[J]. Microelectronics & Computer, 2005, 22(6):109-112.(in Chinese)
- [8] 王洪春,张勤. 基于因果图的一种近似推理算法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2004,27(8):96-99.
Wang Hongchun, Zhang Qin. Approximate reasoning algorithm based on causality diagram[J]. Journal of Chongqing University: Nature Science Edition, 2004, 27(8):96-99.(in Chinese)
- [9] Zhang Qin. Probabilistic reasoning based on dynamic causality tree/diagrams[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994(46):202-220.

[责任编辑:陈 庆]