

改进 BDD 算法在故障诊断中的应用*

肖 苏, 王洪春

(重庆师范大学 数学学院, 重庆 401331)

摘要:【目的】为了在复杂系统中快速定位故障源。【方法】将因果图转化为二元决策图(Binary decision diagram, BDD), 遍历 BDD, 求出引起故障发生的所有割集, 并利用 0-1 编码的方式表示每一个割集, 根据编码的长度确定割集的重要度。【结果】综合考虑结构重要度以及最小割集的发生概率, 确定需要检测故障源的排序。【结论】该方法兼顾了结构重要度大的最小割集诊断优先性及发生概率大的最小割集诊断优先性, 提高了诊断的准确性。

关键词:因果图; BDD; 故障诊断; 哈夫曼码; 结构重要度

中图分类号: TP38

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2019)02-0079-05

目前,故障诊断已成为一个十分活跃的研究领域。张勤教授于 1994 年提出一种新的基于概率论的不确定性推理模型——动态因果图/树理论(Dynamic causality diagram/tree)。该理论对于故障诊断及不确定性推理具有很好的效果,近些年来在故障诊断领域得到了很大的发展。众所周知,在复杂系统中引起故障发生的往往不是由于某一个事件而是几个事件的联合反应,这被称为故障模式。在大型复杂的系统设备中,事件之间的关系错综复杂,故障模式数量庞大,对所有故障模式依次进行检测的工作量巨大,耗时耗力,那么如何确定一个排查的顺序就成为一个最关键的问题。

文献[2]提出了基于因果图最小割集的故障诊断方法。所谓最小割集即表示引起中间事件发生的最少的基本事件的集合,一个最小割集代表一个故障模式,通过对故障模式逐一测试,从而确定故障源。但是在利用因果图法确定故障源的过程中需要求出最小割集,并且需要算出所有最小割集的后验概率,才能得出故障源的检测顺序。该方法过于繁琐,并且在复杂系统中,基本事件数过多,在推理过程中难免出现“组合”爆炸问题。

本文将 BDD 算法与哈夫曼编码思想相结合,从定性和定量两方面对引起故障的原因进行分析和排查,避免了很多不必要的分析和计算,既大大减少了诊断的计算量又提高了准确度。首先,将要进行故障诊断的实际问题各事件之间的逻辑关系用因果图表示^[1]。然后将因果图转化为二元决策图(Binary decision diagram, BDD),用于表达中间事件与基本事件之间的布尔逻辑关系。通过遍历 BDD 结构中从根节点到终结点编号为 1 的所有路径,得到引起中间事件发生的割集(故障模块),直接对割集进行定量分析,最终排查得到故障源。

在进行定量分析的过程中,借用哈夫曼编码的思想,用一个二进制字符串代表一个割集,用哈夫曼编码的长度刻画割集的结构重要度,根据结构重要度的大小可确定故障源的排查顺序。此方法避免了对最小割集以及所有最小割集概率的求解,极大的提高了排查效率。

1 BDD 算法概念及改进转化规则

BDD 是 1978 年由 Sheldon 首先提出,在故障诊断和可靠性领域被广泛应用。BDD 是一种特殊的树型结构,采用二叉树的形式表示一个 Boole 逻辑函数。BDD 中的节点分为两类:一类是具有 0 或 1 两种 Boole 函数值的结点;另一类是非终结点,没有确定的节点值,是内部节点,所有节点都是通过具有 0 或 1 标识的边连接在一起,从而组成一个完整的有向无环图^[3]。

传统的将因果图转化为 BDD 的方法中,基本事件的排序对于 BDD 的规模和计算效率具有直接的影响,但

* 收稿日期:2018-03-07 修回日期:2018-12-07 网络出版时间:2019-01-09 07:38

资助项目:国家社会科学基金(No. 13BTJ008);重庆师范大学研究生科研创新基金(No. YKC17002)

第一作者简介:肖苏,女,研究方向因果图,不确定性推理,E-mail:729538636@qq.com;通信作者:王洪春,男,教授,博士,E-mail:wanghc@cqnu.edu.cn.

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20190109.0731.030.html>

基本事件的排序本身就是一个 NP 难问题。为避免排序,本文采用模块连接法^[4],即考虑将每一个以基本事件为子节点的逻辑门及其子节点看作一个模块,将这些模块表示为一个具体的 BDD 结构,最后利用组合规则将所有模块(子 BDD 结构)连接起来。

规则 1 在子 BDD 形成过程中,对与门而言,输入的基本事件要同时发生,则依次连接在 1 分支上,对或门而言,输入的基本事件至少有一个要发生,则要连接到每一个 0 分支上。

规则 2 在连接两个子 BDD 结构时,其中一个 BDD 将被看作是主 BDD(主 BDD 的选择方法见规则 3),如果分别作为与门的输入,则将次 BDD 替换主 BDD 的每一个 Boole 函数值为 1 的终结点;如果分别作为或门的输入,则将次 BDD 替换主 BDD 的每一个 Boole 函数值为 0 的终结点。

规则 3 在子 BDD 形成过程中,都将基本事件按照概率值由大到小的顺序依次排列。当合并两个子 BDD 时,比较两个 BDD 顶节点发生概率大小,将具有较大发生概率顶节点的 BDD 作为主 BDD,若两个 BDD 顶节点概率值相等,则将依据左优先规则,将因果树中最左边的逻辑门事件转化的 BDD 作为主 BDD^[5]。

在因果图中表示父节点导致子节点发生的连接事件的概率值不一定为 1,即子节点发生并不意味着父节点的发生,这与 BDD 结构相冲突,为保证 BDD 结构的完整性,在此将连接事件与子节点概率进行组合。

规则 4 在 BDD 中非终结点发生的概率为它本身的发生概率与连接事件概率的乘积。

规则 1 与规则 2 为基本的连接规则;规则 3 和规则 4 是参考哈夫曼树和因果树的特性而加入的新规则,目的是为了最终 BDD 结构的唯一性完整性;以上 4 条规则使 BDD 转化过程更为清晰,且转化后的结果与基于 ITE 规则的转化结果一致。

图 1 为因果图微因果树化形成的因果树,以此图为例展示模块连接,最终的 BDD 结构见图 2。

转化过程中,把每一个逻辑门及其子节点看作一个模块,按照规则 1 转化成子 BDD 结构,由规则 4 可知,图 3b 中非终结点 B5 的概率为 $P(B5) > P(B3)$ 。

根据 $P(B3) > P(B1)$,此 BDD 中选取图 3b 为主 BDD。由于无法保证主 BDD 中除顶节点之外的其他节点概率均大于次 BDD,因此并不能保证割集中事件数越多,发生的概率就越小,所以最终的排序结果会有一些影响,但不会跳出相邻两组。

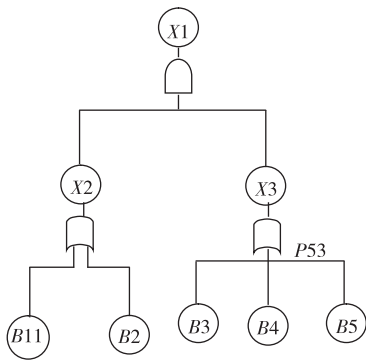


图 1 因果树

Fig. 1 Causality tree

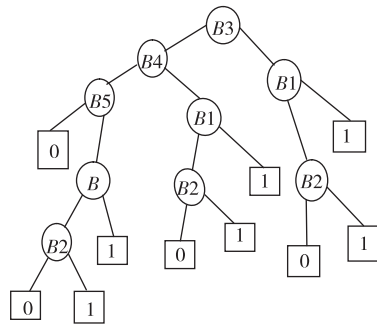


图 2 最终 BDD 结构 ($P(B3) > P(B1)$)
Fig. 2 The final BDD structure
($P(B3) > P(B1)$)

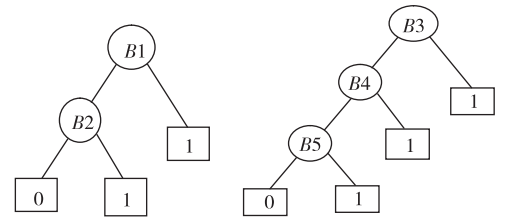


图 3 模块子 BDD

Fig. 3 Module BDD

2 哈夫曼编码理论

定义 1 哈夫曼树是由 n 个带权叶子节点所构成的所有二叉树中带权路径长度最小的二叉树,又叫最优二叉树^[6]。

哈夫曼编码(Huffman code)是 David Huffman 于 1952 年提出的一种编码方法,它是基于哈夫曼树的编码方式。首先根据字符出现的频率值来构造一颗哈夫曼树,叶节点代表一个字符,遍历哈夫曼树,向左分支用 0 表示,向右分支用 1 表示,从根节点开始,沿路线到达这个每个叶节点,此路径所经过的分支代码序列就构成了相应的哈夫曼编码。

例 电文字符集 $\{a, b, c, d\}$, 出现的频率分别为 $\{10, 4, 2, 5\}$, 它的哈夫曼编码的构造如图 4 所示。编码结果为 $H(a)=1, H(b)=011, H(c)=010, H(d)=00$ 。

3 基于改进 BDD 算法的故障推理过程

3.1 中间事件发生的概率

因果图向 BDD 转化的过程,相当于对中间事件进行了求一阶割集,最终割集的过程。而转化后得到的 BDD 中,所有路径都是互斥的,因此通过遍历所有从根节点出发到终结点为“1”的路径中所包含事件的排列即为因果图的不交化割集,根据已知的基本事件的概率即可容易算出顶事件发生的概率。

3.2 基于哈夫曼码的割集排序

明确故障发生后,就需要立刻排除故障源,即找到引起故障发生的底事件或者模块,在由因果图转化而成的 BDD 结构中一个故障模块对应一个割集,每一个割集发生的概率则为割集中所包含的基本事件的概率乘积。因此,当 BDD 结构确定,每一个割集的重要度也确定了。由 BDD 的构造方法可知,BDD 的每条不交化路径便可对应一个割集,所有路径都是由顶至底。如果一条路径通过某个节点并走向它的 1 分支,则该节点代表的底事件发生。如果一条路径通过某个节点并走向向它的 0 分支,则在这条路径上该节点代表的底事件不发生。参考哈夫曼码的编码方法,一个 BDD 结构可看作一个哈夫曼树,遍历 BDD 的每一条由根节点通向终结点编号为 1 的路径,保留路径标号,即可得到一个二进制字符串来代表一个割集,字符串的每一位是 1 或 0,由节点所代表的底事件发生与否来决定。本文借用哈夫曼码的方式确定一个割集的重要度,就避免了对所有最小割集概率之间的两两比较,极大地提高了故障诊断效率。

定义 2 一个割集对应一个唯一的由 1 或 0 所构成的二进制字符串,1 代表对应的节点事件发生,0 代表对应的节点事件不发生。

用一个哈夫曼码来表示一个割集,其中的每一个编码代表一个事件,当编码长度越短就意味着此割集中包含的事件越少,割集的结构重要度也就越大。

定义 3 一个割集的结构重要度由对应的哈夫曼码的长度决定,哈夫曼码长度越短意味着该割集发生故障的概率越大,其结构重要度也就越大。

根据以上定义,所有割集的结构重要度都可以由一个具体的数值来刻画。在割集数目较多的情况下,可以将具有相同结构重要度的割集分在一组,便有效地就缩小了故障的诊断空间,在结构重要度大的组内割集根据概率由大到小排序,从而快速定位故障源。

运用因果图对系统进行故障诊断,可先用改进的 BDD 算法将因果图不交化,再进行定性定量分析,流程见图 5。

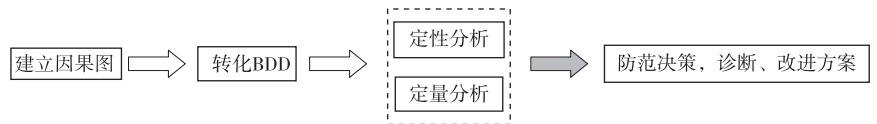


图 5 算法流程

Fig. 5 Algorithm flow chart

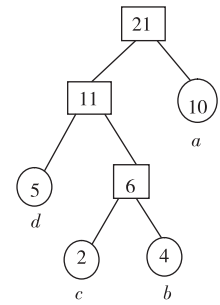


图 4 哈夫曼编码构造

Fig. 4 Huffman coding structure

4 故障分析

以图 6 中的立井箕斗提升系统松绳因果树^[7]为例,进行故障诊断研究。根据以上提出的连接规则,将因果图转化为对应结构的 BDD(图 7)。由于图 6 所示的因果图已经为因果树的结构,所以不再进行微因果化这一步骤。在此因果图中所有连接事件的概率均为 1,所以转化后的 BDD 结构中非终结点事件的概率仍为表 1 中的值。

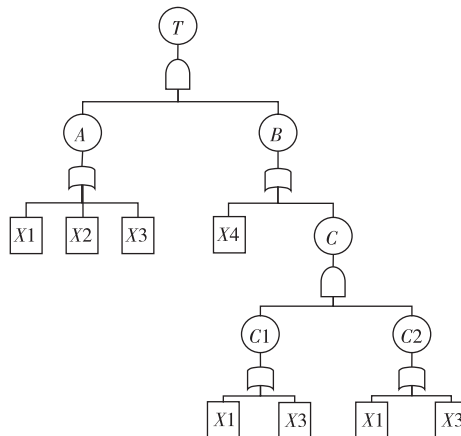


图 6 立井箕斗提升系统松绳因果树

Fig. 6 Causalitytree in hoisting system of vertical shaft skip

5 结论

本文对基于改进的 BDD 算法对系统进行故障检测进行了讨论,根据模块连接法将因果图转化为唯一的 BDD 结构,遍历 BDD 路径得到引起中间事件发生的割集,参考哈夫曼编码的算法,一组割集对应唯一的一个二进制字符串,并用哈夫曼码的长度来量化割集的结构重要度,在检测过程中只需按结构重要度从高到低依次检测即可。该方法避免了简化 BDD 及求解最小割集的步骤,所以极大地提高了检测效率,另外采取二进制编码的方式便于计算及存储,可借助计算机进行辅助运算。实例证明此法有效的提高了检测效率,节约了成本。

参考文献:

- [1] ZHANG Q. Probabilistic reasoning based on dynamic causality trees/diagrams[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 46: 209-220.
- [2] 梁新元. 基于因果图最小割集的故障分析方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(1): 92-94.
LIANG X Y. Research on diagnosis approach based on MCS of causality diagram [J]. Microelectronics & Computer, 2005, 22(1): 92-94.
- [3] 郎荣玲. 故障树转化为二元决策图算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(27): 69-71.
LANG R L. Research on the transformation of fault tree into the binary decision diagram[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(27): 69-71.
- [4] REMENYTE R, ANDREWS J D. A simple component connection approach for fault tree conversion to binary decision diagram[C]//Proc of 1st CONF a vailability, Reliability and Security. Vienna: IEEE, 2006.
- [5] 袁侃, 胡寿松. 一种用于多故障诊断的改进二元决策图算法[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 1117-1120.
YUAN K, HU S T. An improved binary decision diagram algorithm for multiple fault diagnosis[J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 1117-1120.
- [6] 张红军, 徐超. 基于改进哈夫曼编码的数据压缩方法研究[J]. 唐山师范学院学报, 2014, 36(5): 40-43.
ZHANG H J, XU C. Research on data compression method based on improved Huffman coding[J]. Journal of Tangshan Teachers College, 2014, 36(5): 40-43.
- [7] 梁新元. 因果图理论用于煤矿机械设备故障分析的研究[J]. 计算机工程, 2005, 31(5): 204-206.
LIANG X Y. Application of causality diagram in fault analysis of machine equipment in coal mine[J]. Computer Engineering, 2005, 31(5): 204-209.
- [8] 梁新元. 因果图在重大安全事故分析中的应用[J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(4): 483-493.
LIANG X Y. Application of causality diagram in the analysis of major safety accidents[J]. Computer Science and Exploration, 2014, 8(4): 483-493.
- [9] 徐亨成, 张建国. 基于 BDD 技术下的故障树重要度分析[J]. 电子机械工程, 2003, 19(6): 1-4.
XU H C, ZHANG J G. Analysis of the importance of fault tree based on BDD technology[J]. Electronic Mechanical Engineering, 2003, 19(6): 1-4.
- [10] 李淑英, 汪培帧, 杨春. 基于 BDD 算法的故障诊断研究及应用[J]. 电器工程学报, 2017, 12(2): 38-42.
LI S Y, WANG P Z, YANG C. Research and application of fault diagnosis based on BDD algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(2): 38-42.
- [11] 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): 121-124.
LIANG X Y. Study on diagnosis approach based on basic event importance of causality diagram[J]. Microelectronics & Computer, 2004, 21(11): 121-124.

Application of Improved BDD Algorithm in Fault Diagnosis

XIAO Su, WANG Hongchun

(School of Mathematical Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] In order to locate fault source quickly in complex system. [Methods] Turn the causality diagram into a binary decision map (hereinafter referred to as BDD), traversing BDD, find out all the cut sets that cause the failure. And each cut set is represented in a 0-1 coded way. Determine the importance of a cut set according to the length of the code. [Findings] Considering the probability of the importance of the structure and the occurrence of the minimum cut set, the sorting of the fault source is determined. [Conclusions] This method takes into account the structural importance of the minimum cut set the priority of the diagnosis and the probability of occurrence of minimum cut set the priority of the diagnosis, to improve the accuracy of diagnosis.

Keywords: causality diagram; the binary decision diagram; fault diagnosis; huffman code; structural importance