

基于蚁群算法的复杂系统多故障状态的决策

覃方君^{1,2}, 田蔚风¹, 李安², 卞鸿巍¹

(1. 上海交通大学信息检测技术与仪器系, 上海 200030; 2. 海军工程大学电气工程系, 武汉 430033)

摘要: 故障树在设备的故障诊断中被广泛应用。当系统复杂度较大时, 故障模式和故障树的分支会剧烈增加, 故障现象和故障原因因此出现复杂关系, 这必然给故障检测和诊断推理带来极大的困难。在故障诊断中引入一种新的人工智能方法, 即蚁群算法, 可以确定故障树的最优检测次序, 并指导系统多故障状态的决策。由于该方法具有平行性、鲁棒性等特点, 可以很好地解决前面所提问题。仿真结果显示, 在故障树中采用该新方法可行、有效。

关键词: 故障诊断; 故障树; 蚁群算法; 最优检测次序

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Decision-making in Multi-fault State Complex System Based on Ant Colony Algorithm

QIN Fang-jun^{1, 2}, TIAN Wei-feng¹, LI An², BIAN Hong-wei¹

(1. Dept. of Information Measurement Technology and Instruments, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China.)

Abstract: Fault-tree technology is widely used in fault diagnosis field. But in the case of big and complex system, fault patterns and tree branches would be increased greatly. As a result, the relationships between fault phenomena and fault reasons will become complex. This brings big trouble for the process of diagnosis. To tackle this problem, a new intelligent algorithm called ant colony algorithm is introduced. With its outstanding characters of algorithm, the optimal test sequence can be achieved.

Key words: fault diagnosis; fault tree; ant colony algorithm; optimal test sequence

1 引言

故障诊断技术可以提高设备稳定性和可靠性, 延长设备的使用寿命, 因此越来越为人们所关注。故障树分析法(FTA)是一种被广泛应用的逻辑分析故障诊断方法。该方法根据设备故障的内在逻辑关系, 从故障树的顶事件开始故障推理, 最终抵达故障树的底事件, 完成从故障现象到故障原因的诊断过程。

但是当设备比较复杂时, 故障现象和故障原因的数量十分庞大, 故障树分支繁多, 结构复杂, 给故障诊断推理带来了很大的困难。有时同一个故障现象可能对应了多个故障状态, 需要我们利用专家知识、概率方法或对设备进行进一步检测来最终确定故障原因。文献[1]给出了故障检测点优化设计的三大原则及有关概念, 但是没有讨论检测次序的优化问题。文献[2]利用专家知识和经验建立故障树, 确定故障的

收稿日期: 2004-05-19

作者简介: 覃方君(1979—), 男, 上海交通大学信息检测技术与仪器系硕士研究生, 研究方向为智能控制技术和惯性技术。

检测次序。该故障诊断方法已广泛应用于 PL-3、PL-4 惯性导航装备上。由于过度依赖于专家知识,故障树修改和升级比较困难。文献[3]通过对系统故障最小割集的分析 and 转换,给出了故障源搜索的检测点的配置,但是没有给出一个统一优化的搜索步骤。文献[4]对文献[3]做了改进,考虑了故障树最小割集的重要度,重要度大的最小割集优先检测。文献[5]使用模糊概率值代替精确概率值,在故障现象和故障原因的重要度之间建立模糊关系矩阵进行模糊综合决策,可以解决故障现象和原因的交叉问题。但是以上文献对故障检测的代价即难易程度皆没有予以考虑。

本文综合考虑了故障树最小割集的重要度和故障检测点的难易程度两个因素,采用蚁群算法确定故障的最优检测次序,指导多故障状态的决策。将蚁群算法与故障诊断相结合是对故障诊断技术的一种新的尝试和发展。

2 多故障状态及故障最优检测次序问题

当被诊断设备是一个复杂系统时,故障树不可避免地出现多故障状态现象。

图 1 示出了一个典型多故障状态的逻辑关系图。该故障树具有 n 个最小故障割集。一个故障现象 P 对应 n 条故障检测路径 l_1, l_2, \dots, l_n 和 n 个可能故障原因 R_1, R_2, \dots, R_n 。第 i 条检测路径具有 m_i 个检测点 $T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im_i}$ 。通过分别检测第 i 条路径 l_i 便可确定第 i 个故障原因 R_i ($i=1, 2, \dots, n$), 但是由此会产生两个问题:

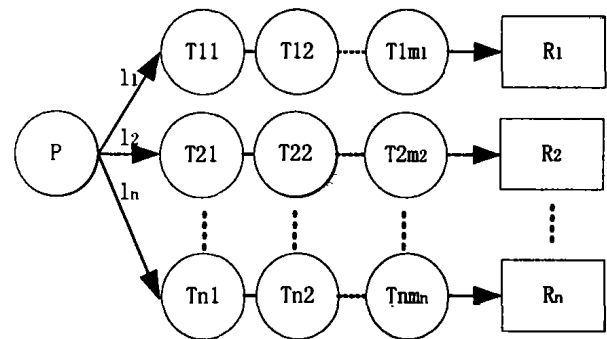


图 1 多故障状态逻辑关系图

- 1) 实施故障诊断时, n 条检测路径 l_1, l_2, \dots, l_n 的先后次序如何选择?
- 2) 对于某一条选定的路径 l_k , 它的 m_k 个检测点 $T_{kj}(j=1, 2, \dots, m_k)$ 检测的先后次序如何确定?

根据实践经验, 显而易见这两种次序不是随意确定, 原因有二:

- 1) 不同的故障源(最小割集)的重要度一般是不一样的, 重要度大的故障源应予以优先考虑;
- 2) 对不同检测点进行检测的难易度一般是不同, 一般容易的检测点予以优先考虑。

因此我们必须同时考虑故障的重要度和检测的难易度这两个因素, 实现故障的最优检测次序。对于某一选定的检测路径 l_k 的 m_k 个检测点, 可按检测难易度由易至难的次序进行检测。如果检测到故障条件, 即可确认故障源 R_k , 立即中止检测; 否则继续直至 m_k 个检测点全部检测完毕。如果 m_k 检测点都不符合故障条件, 则可以排除故障源 R_k 的可能性, 转入其他的检测路径进行检测。这种优化可根据专家知识或实践经验很容易实现。优化的关键问题是对 n 条检测路径 l_1, l_2, \dots, l_n 的最优次序的选择, 本文引入一种新的人工智能的方法, 即蚁群算法可以很好地实现。

3 蚁群算法简介及其在多故障状态决策中的应用

3.1 蚁群算法基本原理^[6, 7]

20 世纪 90 年代意大利学者 M.dorigo、V.Maniezzo、A.Colomi 等人从生物进化的机理受到启发, 通过模拟自然界的蚂蚁的寻径行为, 提出了蚁群算法。蚁群在找到食物后总是能够找到一条从食物所在地到蚁巢的最优路径。科学研究发现, 每一只蚂蚁在它所爬行过的路径上要释放一种特殊的气味, 即信息素, 其浓度和路径长度有关。路径越短, 信息素的浓度越高。对于一条没有气味的路径, 蚂蚁随机选择一条路径爬行回巢, 并在该路径上释放与路径长度相关的信息素作为标记。后来的蚂蚁根据路径上的信

信息素的浓度选择路径。信息素浓度越大, 该路径被选择的概率就越高; 被选中的概率越高, 该路径上留下的信息素浓度越大, 如此形成了一个良性的正反馈, 如图 2 所示。最终蚁群选择的必定是一条从食物所在地到蚁巢的最优路径; 并且在路径选择过程中, 不同路径上可以被不同的蚂蚁同时选中。因此该优化方法具有鲁棒性和平行性等优良特性。

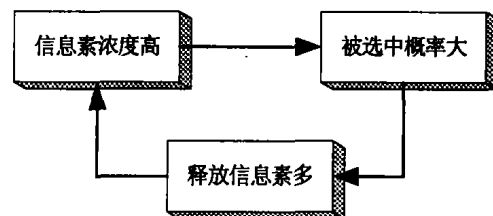


图 2 蚁群算法路径选择的正循环

3.2 最优路径选择的确定

利用蚁群算法的特性, 可以很好地实现 n 条检测路径次序的优化选择。在图 1 中假设有一群蚂蚁在故障现象 P 处觅得食物, 每一只蚂蚁可以选择 n 条路径中的一条 l_k 爬行回到自己的巢穴 $R_k(k=1, 2, \dots, n)$ 。当蚂蚁爬过某一条路径时, 会在该路径上留下一定量的信息素。往后的蚂蚁可以根据路径上的信息素的浓度, 并考虑各故障源的重要度因素, 按照一定的概率选择路径。

设第 i 条路径 l_i 上第 j 个故障检测点 T_{ij} 的难易度为 $d(i, j)$ ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m_i$)。由于若需要确定故障源 R_i , 最多需要进行 m_i 次检测, 最少只需要 1 次检测, 故该路径检测的最大代价为:

$$\text{Max}(i) = \sum_{j=1}^{m_i} d(i, j) \quad (1)$$

最小代价为:

$$\text{Min}(i) = \min\{d(i, 1), d(i, 2), \dots, d(i, m_i)\} \quad (2)$$

如果定义单位蚂蚁在该路径上释放的信息素浓度为:

$$Q(i) = \frac{1}{\text{Max}(i) + \text{Min}(i)} \quad (3)$$

显然, 如果一条路径的检测难度越小, 蚁群更倾向于选择该路径, 并在其上释放的信息素也就越多。

设 t 时刻第 i 条路径上信息素的浓度为 $\tau(t, i)$, 该路径对应的故障源 R_i 的重要度为 $\eta(i)$; 如果同时考虑路径的信息素浓度和故障源的重要度两个因素对路径选择的影响, 则可以定义 t 时刻蚁群对第 i 条路径 l_i 选择的概率为:

$$p(t, i) = \left[\tau(t, i) \right]^\alpha \times \left[\eta(i) \right]^\beta / \left(\sum_{i=1}^n \left[\tau(t, i) \right]^\alpha \times \left[\eta(i) \right]^\beta \right) \quad (4)$$

其中 α 、 β 皆为常系数, 可以调节其大小以改变信息素浓度 $\tau(t, i)$ 和故障源重要度 $\eta(i)$ 对选择概率影响的相对重要性。蚁群刚开始爬行时, 各路径的初始信息素浓度均为零, 路径可随机选择。随着时间的推移, 信息素浓度越高, 故障源重要度越大的路径, 被蚁群选中的概率越大。

设 t 至 $t+1$ 时刻有 s 只蚂蚁选择通过第 i 条路径, 则该路径浓度更新量:

$$\Delta\tau = s \times Q(i) \quad (5)$$

故 $t+1$ 时刻第 i 路径的信息素浓度更新为:

$$\tau(t+1, i) = \tau(t, i) + \Delta\tau \quad (6)$$

通过一定规模的蚁群一段时间的爬行, 最终蚁群总可以找到一条最优的回巢路径。因此我们可以根据各路径上蚂蚁留下的信息素浓度决定故障检测时路径选择的优先次序。信息素浓度越大, 该路径在故障检测时优先级越高, 从而实现检测次序的最优化。

4 应用实例仿真

本文取某型惯性导航设备某一故障的诊断过程进行仿真,如图1所示结构,该故障树具有4条检测路径 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 ,即 $n=4$;各路径的检测点数量分别为: $m_1=0$, $m_2=1$, $m_3=1$, $m_4=1$ 。具体含义如表1。

表1 某型惯性导航设备的一个故障诊断实例

故障现象 P	故障检测 T_2m_2	故障检测 T_3m_3	故障检测 T_4m_4	故障源 R_1	故障源 R_2	故障源 R_3	故障源 R_4
接通舰电源,电流表下红色指示灯不亮。	使用万用电表测量#5板24V电压是否正常。	检查电流表下右边按钮9、10接线柱24V是否正常。	打开电子柜门,听风扇是否有声音。	指示灯故障。	电子柜#6、#7板24V或#3板±25V电压异常。	DCB 变压器1、2接线柱焊接线脱落。	电子柜#9、#10板220V交流电异常。

如果设备的某个故障频繁发生,在故障诊断当中我们总会优先处置,因此可以定义故障的重要度为该故障的发生概率,由实践经验可知4个故障重要度分别为:

$$\eta(1)=0.8, \eta(2)=0.4, \eta(3)=0.7, \eta(4)=0.5 \quad (7)$$

由 $m_1=0$ 可见 l_1 上并没有任何检测点,可以认为故障源 R_1 不便或者无法通过进一步检测的方法予以确认,故定义 $d(1)$ 为无穷大。其它路径上故障检测的代价分别为: $d(2)=2.5$, $d(3)=5$, $d(4)=1.25$,则单位蚂蚁在各条路径上释放的信息素浓度分别为:

$$Q(1)=0, Q(2)=0.4, Q(3)=0.2, Q(4)=0.8 \quad (8)$$

取蚁群大小为14, $\alpha=0.2$, $\beta=0.5$,若规定单位时间内某条路径上只允许一只蚂蚁爬行,按照式(4)~(8)进行仿真计算,最终可得路径 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 上信息素的浓度分别为:0,0.6613,0.1456,16.7158,故最优检测路径的选择次序即为: $l_4 \rightarrow l_2 \rightarrow l_3 \rightarrow l_1$ 。该仿真结果与长期故障诊断实践中的检测次序完全吻合,表明蚁群算法对该优化问题是有效的。

5 总结

对复杂系统进行故障诊断时,不可避免地存在多故障状态的现象,通常采用进一步检测的方法利用额外的信息可以进行一个或数个故障源的确认。针对故障检测的优化次序问题,多数文献只考虑了故障源的重要度。本文同时考虑了故障源的重要度和故障检测的难易度两个因素,使用蚁群算法智能地实现检测次序的最优化。仿真实例表明该优化方法可行、有效。

参考文献:

- [1] 田蔚风,金志华.可靠性技术[M].上海:上海交通大学出版社,1996.
- [2] 刘勇,胡柏青.基于故障树的导航装备故障诊断专家系统研究[J].海军工程大学学报,2002,14(1):42-44.
- [3] 王巍,崔海英,黄文虎.基于故障树的最小割集和最小路径的诊断方法研究[J].数据采集与处理,1991,14(1):26-29.
- [4] 朱大奇,于盛林.基于故障树的最小割集诊断方法研究[J].数据采集与处理,2002,17(2):342-344.
- [5] 朱文予,韦家增.系统多故障状态模糊决策的研究[J].运筹与管理,2002,11(4):66-68.
- [6] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[A]. Proceeding of First Europe Conference on Artificial Life[C]. Paris, France: Elsevier, 1991: 134-142.
- [7] 周勇,陈洪亮.蚁群算法的研究现状及其展望[J].微型电脑应用,2002,18(2):5-7.