

层次化故障诊断系统在设备维修中的应用设计

王 威, 曾钺璐, 尹利博
(中国酒泉卫星发射中心 酒泉 736200)

摘要: 针对复杂电子设备系统故障检测难度大的问题, 在故障树分析法定性定量分析的基础上探讨故障诊断系统的结构模型, 设计辅助设备操作人员对设备故障点确定及维修的层次化故障诊断系统, 以提高设备维修的准确度并且缩短维修时间, 保证设备的良好运行。

关键词: 故障树; 诊断; 层次化; 设计

中图分类号: TP128 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)01-0046-05

The application design of hierarchical fault diagnosis system in equipment maintenance

WANG Wei, ZENG Chenglu, YIN Libo
(Jiuquan Satellite Launch Center in China, Jiuquan 736200, China)

Abstract: In view of the difficulty of fault detection in complex electronic equipment systems, this paper discusses the structural model of the fault diagnosis system on the basis of the qualitative and quantitative analysis of fault tree analysis, and designs the hierarchical fault diagnosis system to determine and maintain the equipment fault point by auxiliary equipment operators. The system improves the accuracy of equipment maintenance and shorten the time, and ensure the good operation of the equipment.

Key words: Fault tree; Diagnosis; Hierarchical; Design

引 言

现代科学技术的不断蓬勃发展, 促使大量的多功能复杂电子设备系统出现, 复杂电子设备系统利用软硬件结合能够执行多种功能的任务活动。目前, 大规模的复杂电子设备系统在全国各地广泛应用, 发挥着极其重要的作用。但电子设备也会常常发生故障, 一旦发生故障由于其复杂的结构, 操作人员往往难以快速有效地定位故障点并进行故障修理, 对工作进度造成影响, 甚至造成巨大损失, 因此必须及时进行维修。

针对此类现象, 最早由美国贝尔电话研究所 H.A. Watson 于 1961 年提出故障树分析法 FTA (Fault Tree Analysis), 是安全系统工程中最重要的分析方法^[1]。通过分析可能造成系统故障的各个因素, 自上而下、一层层地寻找顶事件的直接原因和间接原因事件, 直到剥离出基本原因事件^[2], 将其对应的故障树画出来, 继而对系统失效原因及组合方式进行确定, 得出其具体的发生概率, 并且在此基础上对故障点实施针对性维护^[3]。

本文主要探讨了故障树分析法在复杂电子设备系统维修中的应用。通过对复杂系统进行结构分层, 层次化地诊断设备故障和提供解决方案, 最终快速定位故障点并解决设备故障。

1 故障树分析法的数学表达

从故障树的特点看来, 其作用主要表现为以下三方面^[4]:

- ①对单因素以及多因素故障问题都可分析, 并且可实施定性或定量分析;
- ②从整体各系统到零件都可进行分析, 能够完整地掌握设备状况;

③其分析是基于基本逻辑门构成的逻辑图，简单直观，并且具有诊断高效、易更新知识库的特点，可借助计算机实现。

分析设备的故障树时，首先要进行定性和定量分析，找出其所有的最小割集，确定顶事件和底事件的发生概率^[5]。故障树的一个最小割集代表系统的一个故障模式，只要有一个最小割集存在系统就处于故障状态。在对故障树进行分析之前首先做以下假设：①底事件之间相互独立；②底事件和顶事件只考虑正常或故障两种状态。

考虑由 n 个不同的独立底事件构成故障树，引入二值变量 x_i ，表示第 i 个底事件的状态。定义的事件的状态为^[6]

$$x_i = \begin{cases} 1 & x_i \text{ 发生} \\ 0 & x_i \text{ 不发生} \end{cases} \quad (1)$$

同样引入二值变量 Φ 表示顶事件 T 的状态，顶事件 Φ 的状态完全由故障树中底事件状态向量 x 所决定，即 $\Phi = \Phi(x)$ 。式中， $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为底事件状态向量， $\Phi(x)$ 称为故障树的结构函数，它是表示系统状态的一种布尔函数，其自变量为该系统各组成单元的状态^[7]。

设系统最小割集由 $K=(K_1, K_2, \dots, K_k)$ 构成，在 k 个最小割集中，只要有一个最小割集发生顶事件就发生，故障树的结构函数可表示为

$$\Phi(x) = \bigcup_{j=1}^k k_j(x) = K_1 + K_2 + \dots + K_k \quad (2)$$

式中，每个最小割集 $K_j (1 \leq j \leq k)$ 是底事件 $x_i (1 \leq i \leq n)$ 的积事件。从而，可以分析出故障树顶事件的发生概率为

$$P(T) = p(k_1 + k_2 + \dots + k_k) = \sum_{i=1}^k P(K_i) - \sum_{i < j=2}^k P(K_i K_j) + \sum_{i < j < l=3}^k P(K_i K_j K_l) + \dots + (-1)^{k-1} P(K_1 K_2 \dots K_k) \quad (3)$$

对复杂系统的故障树分析时，有时还会引入最小割集重要度这一概念，在分析故障时优先考虑重要度高的最小割集，定义最小割集重要度为 $P_{MT} = P_M / P_T$ ， P_M 为最小割集 M 的发生概率， P_T 为顶事件的发生概率。

2 故障诊断系统设计

一个完整的故障诊断系统应该具备以下功能^[8,9]：

①故障诊断知识编辑功能：能够提供独立的人机界面，诊断专家和用户可根据故障诊断模型框架建立征兆模型和故障树模型，最终形成故障诊断知识库；

②故障诊断推理功能：能够收集电子设备的工作状态，利用故障诊断知识库进行故障推理，并提供故障信息报告；

③指标检测与统计功能：可对设备进行指标测试并进行评估，对历史测试结果进行统计。通过变化曲线可以使用户了解设备指标变化趋势，以便及时更换指标恶化设备。

④故障诊断专家功能：该模块用于存储故障模型知识，包括出厂时设计人员已提供的故障模型知识点以及设备人员可添加的故障知识点，用来为故障诊断推理功能提供诊断依据。

因此，本故障诊断系统主要由故障诊断知识

编辑软件、故障诊断推理软件、指标监测与统计软件和故障诊断专家组成，各模块之间的关系如图 1 所示。

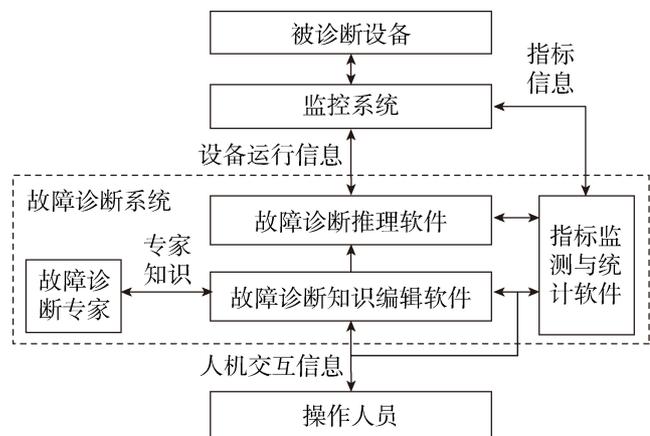


图 1 故障诊断系统各模块之间的关系

Fig. 1 The connection between the modules of fault diagnosis system

2.1 故障诊断知识编辑功能设计

故障诊断系统可采用面向对象的知识表示方法, 即将被诊断设备抽象成由多个部件组成的故障树结构, 每一个部件均具有自身的故障诊断库, 这些部件的故障诊断知识库通过树状结构组织在一起, 构成整个设备的故障诊断知识库模型。整个设备的故障诊断知识库组织如图 2 所示。

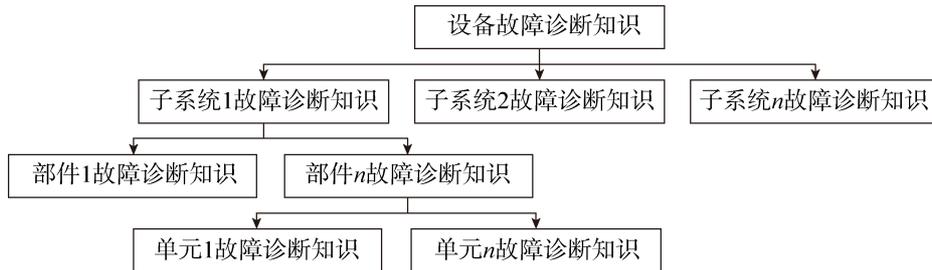


图 2 面向对象的故障诊断知识库模型

Fig. 2 Object oriented knowledge base model for fault diagnosis

其中, 每一个部件除包括自身的故障诊断知识外, 还包括向上层部件输出征兆和故障树。上层部件直接利用子部件现有的诊断知识来构建高层次的诊断模型。因此, 一个基本部件的故障诊断模型由两个子模型组成: 部件诊断模型和部件输出模型。部件诊断模型用来表示部件进行自身故障诊断所需要的知识, 而部件输出模型用来表示部件向外部输出的知识以便顶层部件利用这些输出来诊断上层部件的故障。该基本部件故障诊断知识模型可表示为如图 3 所示的结构。

2.2 故障诊断推理功能设计

故障诊断推理功能实现的初步设计如图 4 所示, 共包括以下五个部分:

- ①模型管理器: 用来读取知识库模型信息, 送到故障推理机中处理。
- ②故障推理机: 作为系统中的核心部件, 用来根据征兆推动系统的故障诊断。在内部按其模型中的部件层次组成关系构成了多个故障诊断引擎, 每个故障诊断引擎包括一个核心的推理机和子部件信息。
- ③监控代理: 用来与监控系统沟通, 获取基本征兆和过程征兆。软件使用配置文件实现与监控系统沟通信息的格式转换, 通过修改配置文件实现与监控之间接口更改。

④统计数据生成器: 用来管理所有的统计数据生成, 向故障推理机提供统计征兆。

⑤诊断 shell: 用来提供故障诊断的人机接口。

在系统启动之后, 通过模型管理器调入故障诊断模型, 显示模型信息。监控代理通过外部接口向监控系统发送征兆获取指令, 监控系统软件以状态

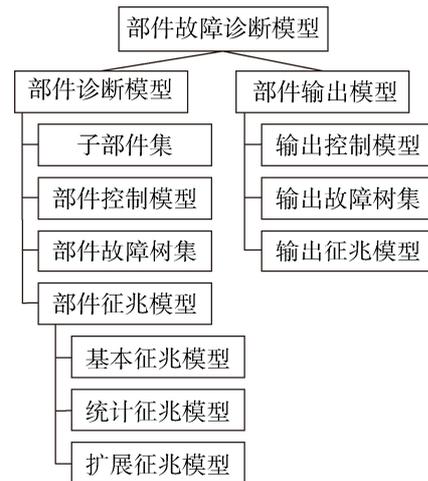


图 3 基本部件故障诊断模型

Fig. 3 Basic component fault diagnosis model

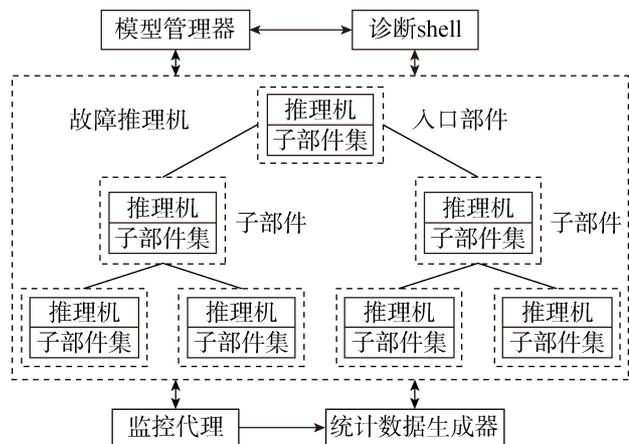


图 4 故障诊断推理结构组成

Fig. 4 Fault diagnosis reasoning structure

返回

作为应答，监控代理将状态信息发送故障推理机。故障推理机依照内部的层次结构分别设置子部件的基本征兆。

根据基本征兆即可进行故障推理引擎的内部推理过程，生成故障列表和故障诊断报告。故障推理机可能需要人工知识，此时软件提示用户输入人工知识，并将人工知识反馈到故障推理机继续推理。如果需要过程知识，故障推理机会向监控代理发送过程申请。监控代理通过监控系统软件获取过程征兆，反馈给故障推理机进一步推理。如果需要均值、方差等统计征兆，故障推理机会向统计数据生成器发送统计数据请求，统计数据生成器生成统计数据反馈给故障推理机进行进一步推理。

2.3 指标监测与统计功能设计

当故障诊断软件向监控系统发送指标测试指令后，由监控系统软件组织完成测试动作，并将测试结果回馈给指标监测与统计软件。指标监测与统计软件依据装订的指标范围值判定指标好坏，并将结果记录到数据库中存储。当统计历史数据时，针对某一指标读取对应的数据库，将历史测试数据形成曲线，可查看指标变化情况。在测试过程中监控软件实时上报监控数据，指标监测与统计软件将监控数据进行处理，根据故障树模型统计故障发生概率以及最小割集重要度，为故障诊断提供参考依据。

3 层次化诊断系统级故障

由于本系统采用面向对象的知识表达方式，能够将一个设备系统进行层次化抽象，在实际应用中一般采用 3 层抽象。将系统级抽象作为一个顶层部件，将各个分系统抽象为顶层部件下的多个子部件，将各个分机作为各个分系统部件下的子部件。

在开展故障诊断时，若操作员发起对系统级故障树的诊断，则系统级故障树调用下层分系统部件的相应故障树，分系统级故障树调用分机部分故障树。通过分机部件故障树诊断出故障原因后再逆向汇报到系统级故障树，最终显示诊断结果，完成系统级故障的诊断。

另外，从定量的角度来说明故障诊断的作用。假设备故障树如图 5 所示，分析故障时首先要找到故障树的最小割集，求故障树最小割集的方法中常用的有上行法和下行法，本文采用下行法找故障树最小割集。下行法的特点是根据故障树的实际结构从顶事件开始逐级向下寻找，找出故障树的所有割集，然后再通过集合运算规则加以简化吸收，得到全部最小割集，求解过程见表 1。

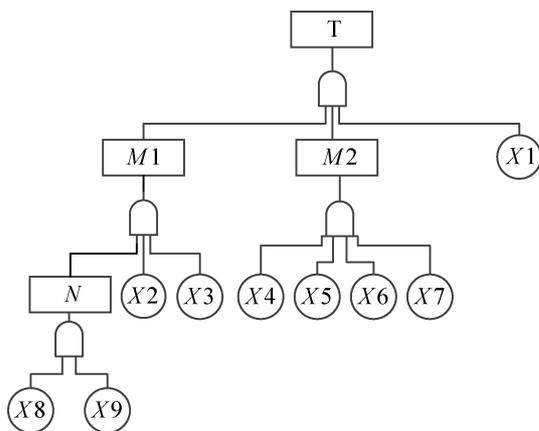


图 5 设备故障树模型

Fig. 5 Equipment fault tree model

表 1 下行法求故障最小割集

Table 1 Finding fault minimum cut set by downward method

| 步骤 | 过程 |
|----|------------------------------------|
| 1 | M1, M2, X1 |
| 2 | N, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X1 |
| 3 | X8, X9, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X1 |

通过最小割集的求解，可以看出顶事件为 T，中间事件为 M1、M2 和 N，底事件为 X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8、X9。假如各底事件的故障概率已知，则可以根据概率公式推算每层部件的故障概率，从而判断设备各环节产生故障的可能性，提前对设备状态进行预判，在设备指标恶化前进行替换，同时在设备检修中提高对高故障率环节的检查监督。

4 结束语

本文通过描述层次化故障诊断系统的结构组成, 依据故障树分析法定性定量分析了故障诊断系统在复杂电子设备维修检测中的重要作用。通过层次化故障诊断, 一方面可以简化诊断体系的复杂程度, 提高故障定位的效率和准确度, 另一方面诊断知识库可以很容易地动态修改并保持一致性。同时, 层次化的故障诊断系统给人清晰直观的感受, 便于将工程师在工作和科研实践中获取的经验和技术应用起来, 对设备故障点快速地确定及维修, 缩短维修时间, 保证设备的良好运行。

参考文献

- [1] 付夏楠, 黄垒, 魏建彦. Mini-GWAC 控制系统的故障诊断专家系统[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(3): 366–372.
FU Xianan, HUANG Lei, WEI Jianyan. The fault diagnosis expert system of mini-GWAC[J]. Astronomical Research and Technology, 2016, 13(3): 366–372.
- [2] 王野, 谢斌, 赵磊. 空防安全对机场空侧捷运信号系统功能的影响分析[J]. 建筑施工, 2020, 42(6): 1014–1017.
WANG Ye, XIE Bin, ZHAO Lei. Analysis of influence of air defense safety on function of airport air side MRT signal system[J]. Building Construction, 2020, 42(6): 1014–1017.
- [3] 李静. 故障树分析法在工程机械维修中的应用[J]. 企业技术开发, 2016, 35(4): 33–34.
LI Jing. Application of fault tree analysis in engineering machinery maintenance[J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(4): 33–34.
- [4] 罗雷. 故障树分析法在某型激光测距机故障检测中的应用[J]. 武警工程大学学报, 2016, 32(4): 54–56.
LUO Lei. Application of fault tree analysis method in fault detection of a certain laser range finder[J]. Journal of Engineering University of the Chinese People's Armed Police Force, 2016, 32(4): 54–56.
- [5] 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, 2002, 17(3): 341–344.
ZHU Daqi, YU Shenglin. Diagnosis approach based on minimal cut sets of fault trees[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2002, 17(3): 341–344.
- [6] 钟飞, 刘传伟, 邓世东, 等. 基于故障树的发射机故障诊断[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(1): 111–113.
ZHONG Fei, LIU Chuanwei, DENG Shidong, et al. Fault diagnosis of transmitter based on fault tree[J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(1): 111–113.
- [7] 李云龙. 基于力学性能实验的钢货架结构可靠性设计与其标准研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
LI Yunlong. Reliability research design and standards-based mechanical properties of structural steel shelves experiment[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [8] 陈荣, 刘富. 芯片信息加载故障诊断的故障树分析法[J]. 导航定位学报, 2016, 4(3): 6–9.
CHEN Rong, LIU Fu. Fault tree analysis on fault-diagnosis of chip information loading[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(3): 6–9.
- [9] 魏常丽, 樊海峰. 基于故障树分析法故障辅助处理系统的探讨[J]. 铁道通信信号, 2016, 52(6): 34–36.
WEI Changli, FAN Haifeng. Discussion based on fault tree analyze faults auxiliary treatment system[J]. Railway Signalling & Communication, 2016, 52(6): 34–36.

[作者简介]

王 威 1989 年生, 硕士, 助理工程师, 研究方向为无线电遥测遥控。

曾铖璐 1983 年生, 本科, 工程师, 研究方向为无线电遥测遥控。

尹利博 1986 年生, 本科, 助理工程师, 研究方向为无线电遥测遥控和光学测量。