

文章编号: 1674-8190(2023)06-133-10

基于动态故障树的故障隔离程序分析方法

柯倩云, 涂志琦, 刘亚奇

(中国商飞上海飞机客户服务有限公司 技术出版物部, 上海 201100)

摘要: 传统的故障隔离程序采用常规静态故障树进行故障分析, 可能会导致故障原因分析不全、故障隔离路径过于繁琐等问题。提出基于系统原理和动态故障树进行故障隔离程序分析的方法, 以某飞机防火系统引气导管过热探测系统故障为实例, 进行系统设计原理和故障告警逻辑分析, 引入动态逻辑门, 构建具有顺序相关、功能相关和备份关系的动态故障树; 在此基础上进行关联故障分析和排查流程图转化。结果表明: 该方法能系统地、全面地反映故障触发逻辑, 提供快速、准确、有效的故障隔离程序, 提高飞机维修保障水平, 在复杂飞机系统的航线维修领域具有良好的应用前景和推广价值。

关键词: 动态故障树; 排查流程图; 故障隔离程序; 航线维修领域

中图分类号: V267; TB114.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.15

Fault isolation procedure analysis method based on dynamic fault tree

KE Qianyun, TU Zhiqi, LIU Yaqi

(Technical Publications Department, COMAC Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: The traditional fault isolation program uses the conventional static fault tree for fault analysis, which may lead to incomplete fault cause analysis, too cumbersome fault isolation path and other problems. A method of fault isolation program analysis based on system principle and dynamic fault tree is proposed. Taking the fault of the bleed air overheat detection system of an aircraft fire protection system as an example, the system design schematics and fault alarm logic analysis are carried out in depth, and a dynamic fault tree with sequence correlation, function correlation and backup relationship is constructed by using dynamic logic gates, and then correlation fault analysis and troubleshooting flow chart transformation are carried out. The results show that the method can systematically and comprehensively reflect the fault trigger logic, provide a fast and effective fault isolation path, and has good application prospect and popularization value in the line maintenance field of complex aircraft systems.

Key words: dynamic fault tree; troubleshooting flow chart; fault isolation procedure; line maintenance field

收稿日期: 2022-07-06; 修回日期: 2022-09-29

通信作者: 柯倩云, ke_qianyun@163.com

引用格式: 柯倩云, 涂志琦, 刘亚奇. 基于动态故障树的故障隔离程序分析方法[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 133-142.

KE Qianyun, TU Zhiqi, LIU Yaqi. Fault isolation procedure analysis method based on dynamic fault tree[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 133-142. (in Chinese)

0 引言

故障隔离程序用于指导飞机维护人员快速准确地定位并纠正故障,降低飞机停机时间,保障飞机顺利运行^[1-2]。分析出所有可能导致故障出现的原因、构建快速有效的故障隔离路径是保证故障隔离程序完整性和准确性的关键。

目前故障隔离程序分析主要采用基于故障树的分析方法。传统的故障隔离程序故障树分析方法只针对单点故障,忽略了级联故障和并发故障。随着民用飞机技术的发展,系统功能综合性不断提高,复杂性也随之增强,其故障与故障之间、部件与部件之间相互作用,具有明显的动态失效特征,包括时序关系、功能相关关系、备份关系等。因此,采用常规的静态故障树进行故障隔离分析可能会导致故障原因分析不全、故障隔离路径过于繁琐等问题。

1992年,J. B. Dugan提出了用于表示系统动态工作关系的动态逻辑门^[3-4],弥补了静态故障树在复杂动态系统中建模能力的缺陷。目前,动态故障树在故障分析领域已有诸多应用研究。李佩昌等^[5-6]将动态故障树应用于不完全覆盖系统;饶乐庆^[7]、张玉良^[8]研究了动态故障树在液压系统中的应用,证明动态故障树可有效应用于系统可靠性分析领域;徐璇^[9]在民用飞机适航安全性验证中引入了动态故障树;J. B. Fussell等^[10]、W. Long等^[11-12]在维修领域提出了基于动态故障树的量化分析方法,结果表明,动态故障树在量化计算方面能得到更为准确的结果。还有研究在故障诊断等领域应用了动态故障树分析理论,表明动态故障树能有效突破传统故障树建模的局限性^[13-17]。

目前尚未查到使用动态故障树分析方法进行航空领域故障隔离程序编写的研究,考虑到民用飞机故障发生机理的动态特性对故障隔离程序的分析至关重要,本文提出采用动态故障树进行故障隔离程序建模,并根据故障树的动态逻辑关系进行关联故障分析和排故流程图转化的方法,以防火系统故障为例进行实例分析,以验证该方法的可行性和准确性。

1 动态故障树概述

1.1 动态逻辑门

民用飞机系统故障由关联故障、关联部件的状态以及它们之间的相互作用关系决定。结合民用飞机系统的特性,本文主要研究的动态逻辑门包括功能相关门(Functional Dependency Gate,简称FDEP)、优先与门(Priority AND,简称PAND)、冷备份门(Cold Spare,简称CSP)和热备份门(Hot Spare,简称HSP)。

1) 功能相关门

在某些情况下,触发事件发生后,相关部件的失效与否不会对系统的输出状态产生影响。

2) 优先与门

优先与门在与门的基础上规定了输入事件的发生次序,当且仅当输入事件同时发生,且输入事件按从左到右的顺序发生时,输出事件发生。

3) 备份门

冷备份是指在激活工作之前不会失效的输入事件,热备份是指系统开始工作就处于工作状态的事件,作为替补输入。当所有输入事件都发生以后,输出事件发生。

动态逻辑门的图形符号如图1所示。

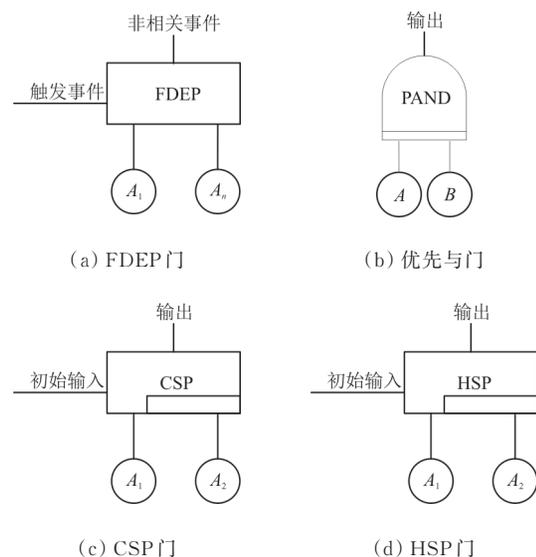


图1 动态逻辑门

Fig. 1 Dynamic logic gate

1.2 动态故障树构建流程

动态故障树的构建流程如图2所示。

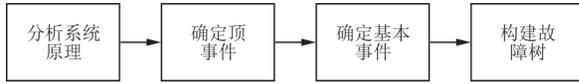


图2 动态树构建流程

Fig. 2 Dynamic fault tree construction process

对于复杂系统,需全面掌握设计原理、组成结构、功能接口、故障触发条件、维护等方面的信息。

顶事件的确定一般需要综合考虑主要技术指标、维修性等其他重要特征,将最不希望发生的、具有明确定义的事件作为顶事件。

基本事件是导致系统发生失效的最底层原因,基本事件的颗粒度直接决定了动态故障树的复杂性。

一般建树方法分为两类:演绎法和计算机辅助建树法。演绎法便于了解系统内故障事件的逻辑关系,也便于后期对故障进行监测和诊断。

2 故障隔离程序分析方法

2.1 系统原理分析

民用飞机系统设计原理的主要数据来源于系统描述文档、系统原理图和接口控制文件等,在必要的情况下,还可通过飞机/系统功能危害性分析、安全性评估报告、故障模式及影响分析、测试性分析等增加对系统的原理解。系统的原理分析应达到以下要求:

- 1) 透彻掌握系统的设计意图、结构、功能、边界(包括人机接口)和环境情况;
- 2) 辨明人为因素、环境因素和软件对系统功能的影响;
- 3) 辨明各因素的时序关系和逻辑关系;
- 4) 辨识系统的各种状态模式及其对应关系,以弄清系统功能、故障与部件三者之间的关系。

2.2 动态故障树构建

2.2.1 确定顶事件

对于故障隔离手册,故障隔离程序分析对象

主要包括:指示类故障和观察类故障。指示类故障包括发动机指示及机组告警系统(Engine Indication and Crew Alerting System,简称EICAS)信息、中央维护系统(Central Maintenance System,简称CMS)信息以及非信息类故障指示,例如语音音响告警、灯光告警、简图页指示灯。观察类故障指的是能够通过飞行机组和维修人员的感知所进行识别的故障,例如发动机启动慢、发动机异响、客舱异味等。上述故障隔离程序的分析对象列为顶事件。

2.2.2 确定边界条件

边界条件是指建树前对系统、部件提出的合理假设条件,其确定了故障树的分析范围。故障隔离程序分析的通用边界条件为:

- 1) 故障信息报告及指示系统工作正常;
- 2) 出现故障之前,故障系统工作正常;
- 3) 出现故障之前,所有部件安装位置和功能正常。

此外,针对不同的故障,可按实际情况根据部件失效概率以及部件影响程度等因素确定边界条件。

2.2.3 确定基本事件颗粒度

基本事件通常是故障原因,包括航线可更换单元(Line Replaceable Unit,简称LRU)、人为因素、环境因素等。但是,对于故障隔离程序来说,除了找到故障原因外,还需要进一步找到引发故障原因的根本原因或者找到故障件的具体故障模式,以便于根据不同的故障模式和根本原因采取故障检测方法和纠正措施。因此,故障隔离程序动态故障树的基本事件需明确详细的故障原因或故障模式。例如,明确基本事件为“导线开路”而非止于“导线”。

2.2.4 建树并简化

CMS信息是故障定位精确度较高的告警信息,当多个CMS信息同时故障,或者故障等级较高时,触发EICAS告警信息以提醒飞行员采取相应措施。对于逻辑关系复杂的故障,例如包含关联CMS信息的EICAS信息,在逐级分解的过程中会呈现出其关联逻辑关系,即CMS信息以中间事件

的形态存在于 EICAS 信息或观察类故障的动态故障树中。这个逻辑关系是关联故障分析的基础。

对于包含冗余部件和备份部件的系统,应使用热备份门或冷备份门进行建树。

对于包含监控单元或数据采集单元等存在依赖关系的系统,应使用功能相关门进行建树。

对于告警逻辑包含时序及递进关系的系统,应使用优先与门进行建树。

动态故障树建造完毕后,必须对其进行认真审查,确定有无遗漏故障分支,逻辑结构是否严谨,有无逻辑混乱和自相矛盾,同时审查有无多余的逻辑关系。

2.3 关联故障分析

故障隔离程序的动态故障树除了能准确表示出部件与部件之间的顺序相关性和逻辑相关性外,也能表示出故障与故障之间的时序相关性和逻辑相关性。对动态故障树进行简化处理,保留顶事件、CMS 信息中间事件以及其必要的逻辑门,可直观展示顶事件与 CMS 信息的关联关系。

2.4 排查流程图绘制

故障隔离程序的本质是排查流程,其程序步骤与排查流程图的排查支路一一对应。在完成关联故障分析后,基于动态故障树分析得到的故障原因,绘制排查流程图。要提高航线排查效率,降低航线维修成本,则需要给出快速准确的故障判断方法和故障纠正措施。

不同的动态逻辑门一般可按下列思路转换:

1) 功能相关门。依赖事件与被依赖事件可通过测试等步骤判断,拆分为两个独立的分支。

2) 优先与门。先发生的事件可作为后发生事件是否发生的判断依据,即:为判断后事件是否发

生,可通过判断先事件是否已发生。先事件与后事件处于同一分支,且具有顺序承接关系。

3) 备份门。只有当初始事件与备份事件都发生时,输出事件才发生。可视为与门,其备份关系可在故障隔离程序中作为触发逻辑说明。

4) 或门。或门事件一般无直接的逻辑关系,此时需要综合考虑故障率、接近的难易程度和操作成本等进行故障隔离排序。

5) 与门。与门事件一般同时出现,需同时采取故障隔离措施。

排查流程图的绘制应遵循以下原则:

1) 每一个操作步骤都应该有一个明确的主题,原则上一个主题一个步骤;

2) 除终止步骤外,每个操作步骤结束后,都要有一个选择或问答^[18];

3) 在每一个选项后必须明确给出下一步操作措施。

3 实例分析

民用飞机防火系统为引气区域提供安全可靠的过热探测措施,为机组和维护人员提供快速准确的告警指示。以某民用飞机防火系统引气区域过热探测系统故障为例,验证本文分析方法的有效性。

3.1 系统原理分析

1) 引气导管过热探测

引气渗漏过热探测系统监测引气周围的过热状况,监测到过热状况后进行告警指示。探测到某个区域过热时,防火控制盒(Fire and Overheat Control Unit,简称 FOCU)过热探测卡(Over Detection Card,简称 ODC)通过航电系统在驾驶舱触发告警指示,驾驶员关闭相应的引气切断阀,从而将泄漏的导管隔离。系统原理图如图 3 所示,探测环路连接关系如图 4 所示。

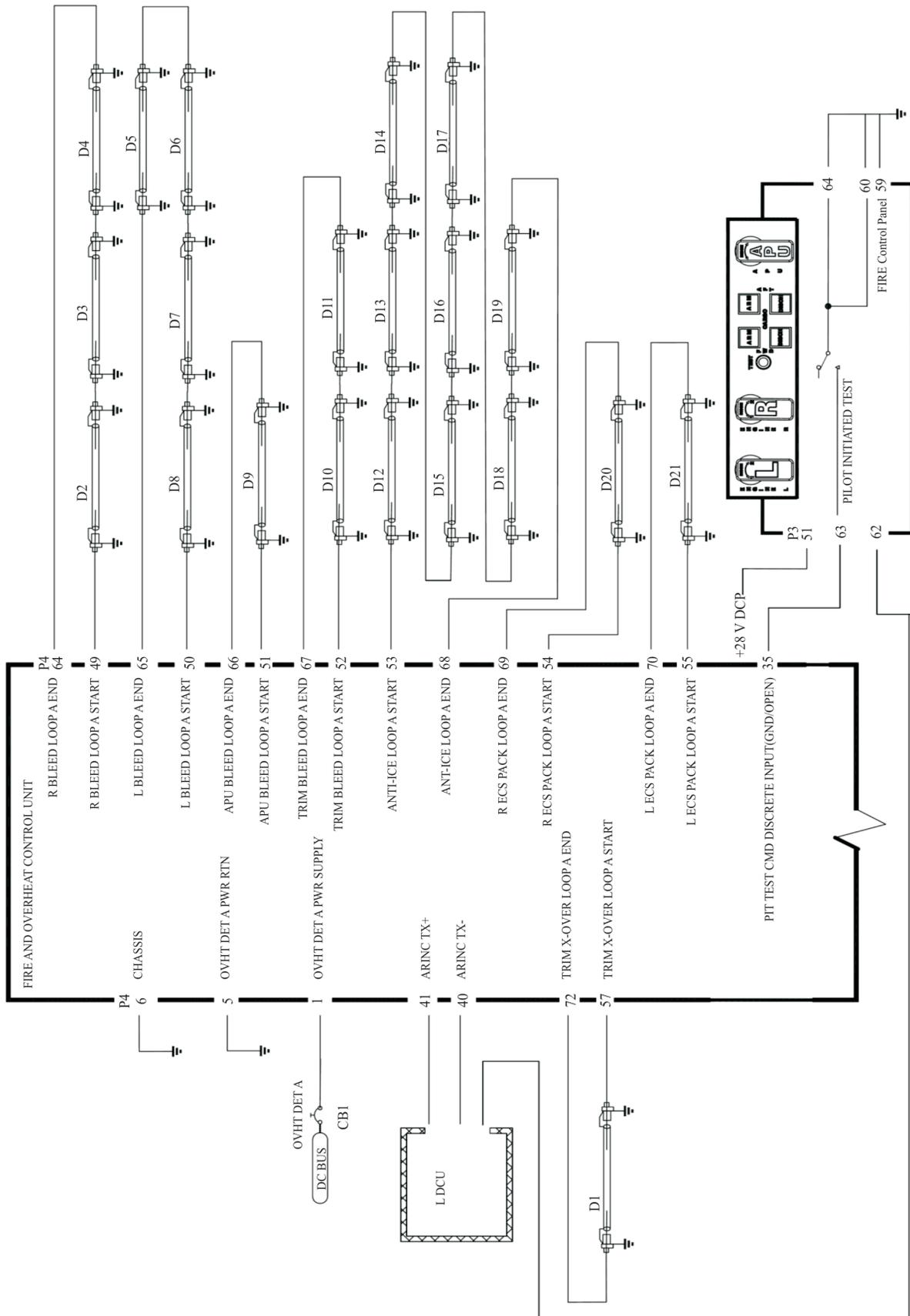


图 3 防火系统原理图

Fig. 3 Fire system schematics

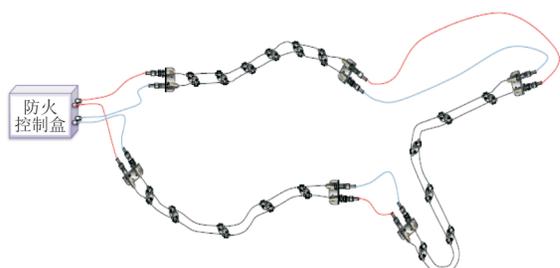


图4 探测环路连接关系

Fig. 4 Detect loop connection relationship

2) 防火控制盒架构

防火控制盒是防火系统各子系统的集中控制单元,包含火警探测和过热探测两块物理和功能完全独立的电路板(如图5所示)。其中ODC卡负责引气区域的引气渗漏过热探测功能。ODC卡的两个通道都通过ARINC429总线与数据集中单元(Data Concentrator Unit,简称DCU)通讯。

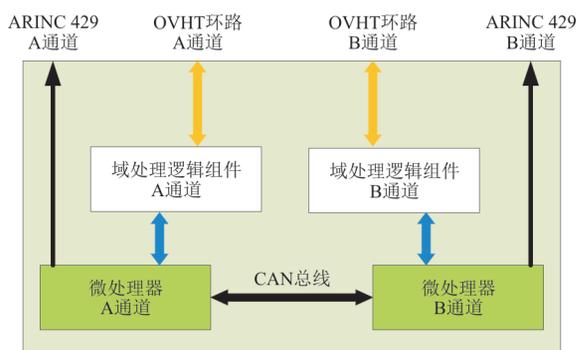


图5 防火控制盒ODC架构

Fig. 5 FOCU ODC architecture

3) 引气导管过热探测器原理

引气导管过热探测器由中心导线、高温合金外壳以及填充在中心导线和外壳之间的共晶盐材料组成。中心导线两端连接到防火控制盒,外壳通过端头支架接地,如图6所示。中心导线与外壳之间填充的是共晶盐材料,常温下共晶盐材料是绝缘的,电阻为兆欧级,受热时电阻会迅速降低,如图7所示。

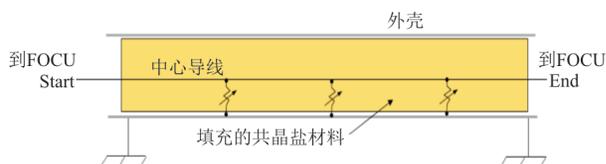


图6 引气导管过热探测器

Fig. 6 Bleed air duct overhear detector

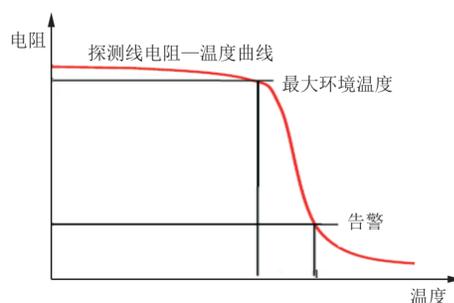


图7 引气导管过热探测器温度曲线

Fig. 7 Bleed air duct overhear detector temperature curve

4) 探测环路故障告警逻辑

防火控制盒ODC卡对中心导线的对地电阻进行持续监控,当探测器受热电阻值降低到告警阈值时,触发过热OVHT的CMS告警。当电阻值下降的速率远远大于过热导致的下降速率时,触发短路SHORT的CMS告警。

防火控制盒对整个环路的中心导线电阻值进行监控,当中心导电阻值增大到大于阈值Y1时,触发降级DEGRADE的CMS告警,当中心导电阻值继续增大到大于阈值Y2时,触发开路OPENT的CMS告警。

防火系统采用双环路冗余构型,探测环路成对安装。当两个环路都正常工作时,告警逻辑采用“与”逻辑;当单个环路故障时,告警逻辑切换为“或”逻辑。当两个环路都发生故障时,防火系统探测功能失效,触发探测系统FAULT的EICAS告警。

3.2 动态故障树构建

EICAS信息“探测系统FAULT”为顶层故障(顶事件),开展故障隔离程序动态故障树构建。

确定边界条件:①不考虑飞机级系统失效;②由于探测器安装支架破损概率极小,忽略该事件。

3.2.1 顶事件故障分析

由系统原理分析可知,当探测A环路和B环路都出现故障时,顶事件发生。两个环路都可能发生开路OPEN和短路SHORT故障,此时故障逻辑门可选择使用传统故障树的表决门、“与+或”组合门。考虑到A、B两个环路为冗余构型,可认为两者互为热备份。若使用表决门则无法表达出二者互为热备份的关系,因此,采用“与+或+热备份”组合门表示。由于A、B环路故障相似,实例中以A环路为例开展分析,B环路使用转接事件符号替代。

当以下一个或多个事件发生时,顶事件发生:

- 1) 互为备份的A/B环路同时发生开路故障;
- 2) A环路发生开路故障且B环路发生短路

故障;

3) B 环路发生开路故障且 A 环路发生短路故障;

4) 互为备份的 A/B 环路同时发生短路故障。

3.2.2 探测 A 环路开路告警分析

探测 A 环路一段或多段线状探测器与 EWIS 部件串联成环路,其首尾分别连接到防火控制盒上,由防火控制盒 ODC 卡传递环路的工作状态。如果防火控制盒 ODC 卡故障,则探测环路不可用,即探测环路依赖于防火控制盒 ODC 卡,因此二者功能相关,使用功能相关门表示。若使用传统故障树,则只能用或门表示,在后续的排故流程图中无法通过分支简化故障隔离路径。由探测环路开路告警逻辑可知,当探测环路中心导线阻值大于阈值 Y2 时,触发环路开路告警。

3.2.3 探测 A 环路中心导线阻值大于阈值 Y2 故障分析

探测环路由探测器和 EWIS 线路串联组成,而 EWIS 线路阻值可记为零。因此,探测环路阻值超

过阈值可能的原因为 EWIS 线路开路或探测器中心导线阻值超过阈值。

3.2.4 探测器中心导线阻值大于阈值 Y2 故障分析

探测器由两部分组成,探测器本身和带导线的连接器。当探测器或带导线的连接器发生开路故障时会导致探测器中心导线阻值大于阈值 Y2。

当探测器接头或导线的连接器由于振动、环境潮湿、冷热温差等因素发生接头松动、氧化、污染时,可能会导致电阻值增大。此时等环境因素与接头松动、氧化、污染构成促使探测器中心导线电阻值增大的顺序事件,可用优先与门表示其顺序关系。

当电阻值增大到阈值 Y1 时,触发环路降级告警,当电阻值继续增大时,触发环路开路告警。由此可知,降级告警与阻值继续增大也构成促使探测器中心导线电阻值继续增大的顺序事件,可用优先与门表示其顺序关系。

3.2.5 探测 A 环路短路告警分析

探测 A 环路短路告警分析过程与开路告警类似。EICAS 信息探测系统故障树如图 8 所示。

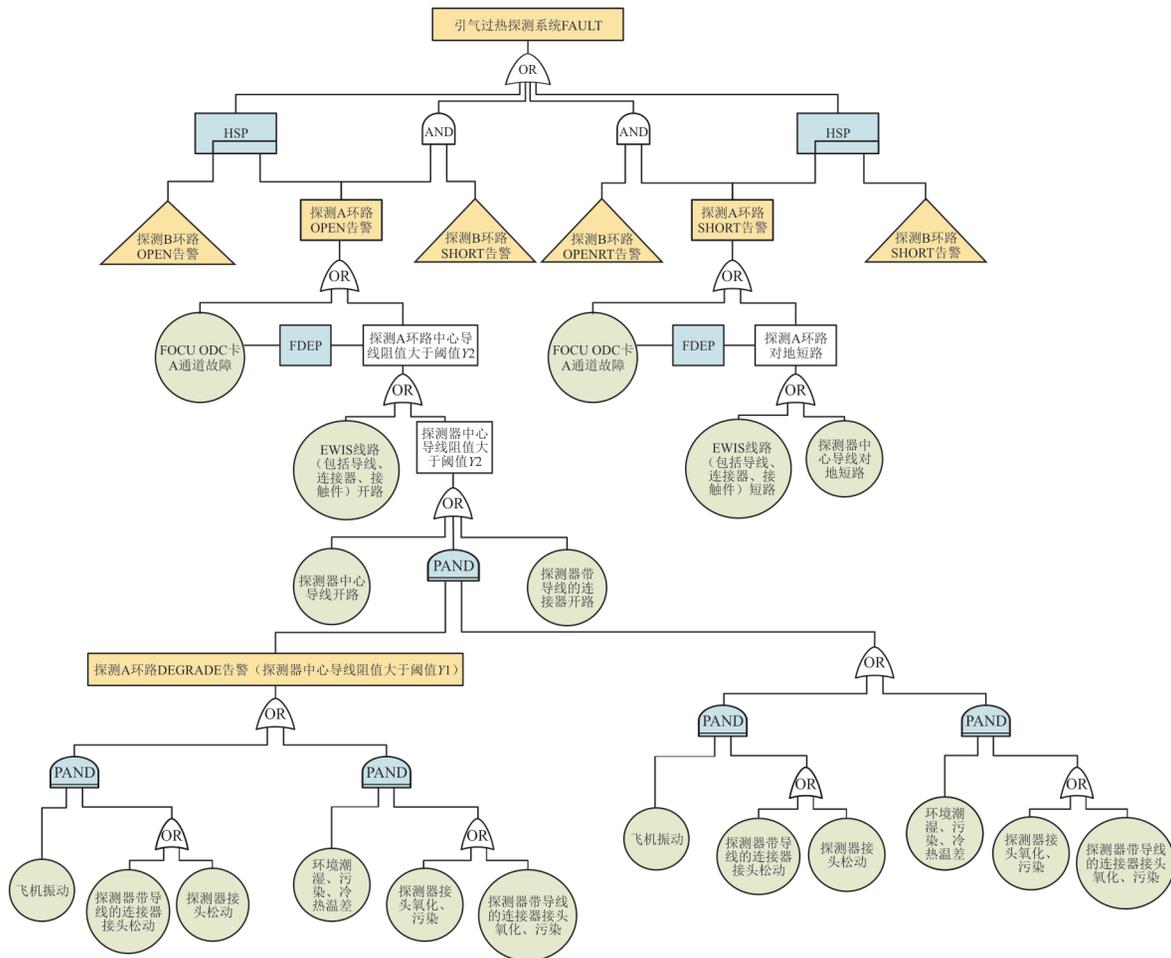


图 8 引气过热探测系统故障树
Fig. 8 Bleed air duct overheate detect system fault tree

而采用传统故障树的故障分析,只是对故障原因简单的排列组合,无法给出明确的功能相关、顺序等逻辑关系。

3.3 关联故障分析

由上述动态故障树可知,探测系统 FAULT 的 EICAS 信息关联了以下 CMS 信息:

- 1) 探测 A 环路开路 OPEN;
- 2) 探测 A 环路短路 SHORT;
- 3) 探测 B 环路开路 OPEN;
- 4) 探测 B 环路短路 SHORT。

且其关联逻辑为,探测 A 环路和 B 环路都至少有一个故障。因此,该 EICAS 信息无需单独故障隔离程序,只需给出其关联的 CMS 信息清单,当飞机出现该 EICAS 信息后,必定有关联的 CMS 信息

出现,此时需按 CMS 信息的故障隔离程序进行排故。

同时,从上述动态故障树可知,探测 A 环路开路 OPEN 的 CMS 信息与探测 A 环路降级 DEGRADE 的 CMS 信息可能存在顺序发生的关系。

3.4 排故流程图绘制

在关联故障分析中得知探测系统 FAULT 的 EICAS 信息无需编写故障隔离程序,而是通过关联 CMS 信息的方式间接进行故障隔离,无需绘制排故流程图。根据动态故障树及排故流程图绘制方法分别绘制探测 A 环路开路 OPEN(如图 9 所示)、探测 A 环路短路 SHORT(如图 10 所示)和探测 A 环路降级 DEGRADE 的排故流程图(如图 11 所示)。

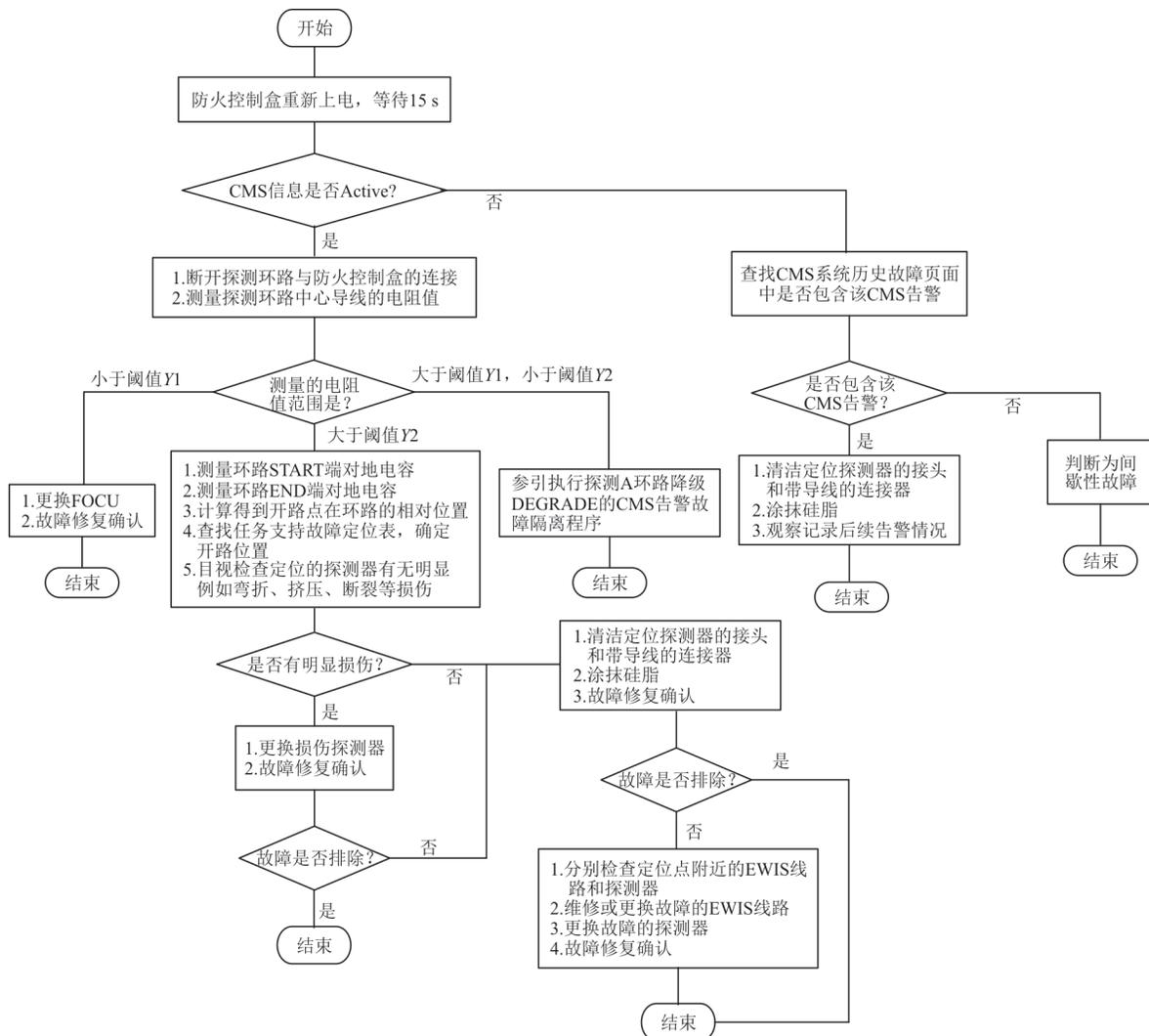


图9 探测 A 环路开路排故流程图

Fig. 9 Flow chart for loop A open

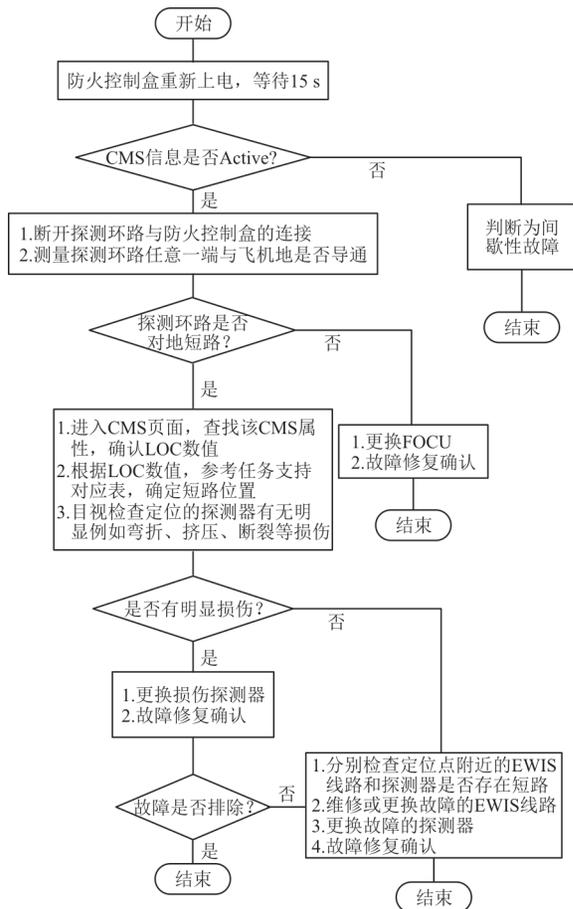


图 10 探测 A 环路短路排查流程图
Fig. 10 Flow chart for loop A short

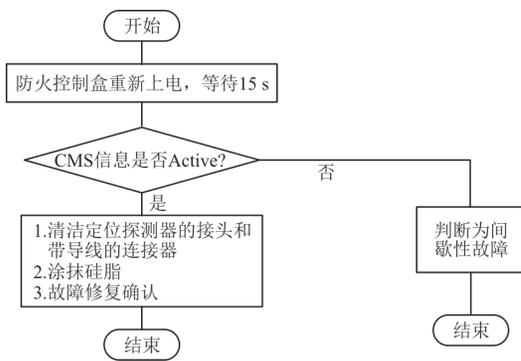


图 11 探测 A 环路降级排查流程图
Fig. 11 Flow chart for loop A degrade

从图 9~图 11 可以看出: 排查流程图出现多路故障隔离步骤分支, 排查过程可根据不同的测试结果选择不同的故障隔离路径, 减少不必要的步骤。

对比传统故障树分析方法, 由于其只能得到故障原因的排列组合关系, 无法得出其逻辑关系, 因此, 只能通过逐个故障原因进行测试排除, 可能会出现所有故障原因都进行过排除步骤才找出最

终故障原因的情况, 造成因排故效率低导致飞机长时间停场。

综上所述, 使用动态故障树进行故障分析, 能够清晰地展示故障触发逻辑, 为排故流程图的绘制及排故程序编写提供了清晰的数据基础。以引气导管过热探测系统的故障分析实例, 充分验证了基于系统原理和动态故障树进行故障隔离分析的方法是有效的、准确的。目前该方法已在多个系统的复杂故障分析活动中推广应用。

4 结 论

1) 本文提出的基于系统原理和动态故障树的故障隔离程序分析方法充分考虑了民用飞机复杂系统的动态特征。

2) 传统故障树只单纯地考虑故障原因的“与或”组合失效, 然后用逐步排除法隔离故障, 排故效率较低。本文使用动态逻辑门能准确地表示故障之间以及部件之间的动态逻辑关系, 通过动态逻辑门向排故流程图转化, 能明确表示故障的关联关系, 在特定步骤进行故障隔离路径分支, 可减少不必要的操作, 提高航线排故效率。

3) 以某民用飞机防火系统故障为例, 基于系统原理和动态故障树进行故障隔离程序的分析, 证明该方法能得到快速、准确的故障隔离路径, 在复杂飞机系统的航线维修领域具有良好的应用前景和推广价值。

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局. 航空器的持续适航文件: AC-91-11 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.
Civil Aviation Administration of China. Aircraft continuous airworthiness documentation: AC-91-11[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2014. (in Chinese)

[2] 中国民用航空局. 航空器制造厂家运行支持体系建设规范: MD-FS-AEG006[S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.
Civil Aviation Administration of China. Aircraft manufacturer support development specification: MD-FS-AEG006 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2014. (in Chinese)

[3] 刘东, 张红林, 王波, 等. 动态故障树分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 1-43.
LIU Dong, ZHANG Honglin, WANG Bo, et al. Methodologies of dynamic fault trees analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 1-43. (in Chinese)

[4] DUGAN J B. Galileo a tool for dynamic fault tree analysis

- [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 328-331.
- [5] 李佩昌, 袁宏杰, 兰杰, 等. 基于顺序二元决策图的动态故障树分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(1): 167-175.
LI Peichang, YUAN Hongjie, LAN Jie, et al. Dynamic fault tree analysis using sequential binary decision diagrams [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(1): 167-175. (in Chinese)
- [6] 李佩昌, 袁宏杰, 曹振亚, 等. 不完全覆盖系统的动态故障树定量分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(9): 1986-1991.
LI Peichang, YUAN Hongjie, CAO Zhenya, et al. Quantitative method of dynamic fault tree analysis for imperfect coverage system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(9): 1986-1991. (in Chinese)
- [7] 饶乐庆. T-S 动态故障树分析方法及在液压系统中的应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
RAO Leqing. T-S dynamic fault tree analysis method and its applications in hydraulic system [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018. (in Chinese)
- [8] 张玉良. 一种新型动态故障树分析方法及在液压系统中的应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
ZHANG Yuliang. A new dynamic fault tree analysis method and application in hydraulic system [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016. (in Chinese)
- [9] 徐璇. 面向适航的民机系统动态故障树分析方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
XU Xuan. Research on dynamic fault tree analysis method of civil aircraft system for airworthiness [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [10] FUSSELL J B, ABER E F, RAHL R G. On the quantitative analysis of priority-AND failure logic [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1976, 25(5): 324-326.
- [11] LONG W, SATO Y, HORIGOME M. Quantification of sequential failure logic for fault tree analysis [J]. Reliability Engineering System Safety, 2000, 67(3): 269-274.
- [12] LONG W, ZETO T L, LU Y F. On the quantitative analysis of sequential failure logic using Monte Carlo method for different distributions [J]. Journal of the Tokyo University of Mercantile Marine Natural Sciences, 2002, 53: 49-54.
- [13] 孟庆贺. 基于正向推理的航空工程系统故障树建模理论与方法[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
MENG Qinghe. Theory and methodology for the fault tree construction of the aeronautic engineering system based on forward reasoning [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)
- [14] 文天柱, 许爱强, 王怡苹. 基于可拓规则推理的故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(3): 506-513.
WEN Tianzhu, XU Aiqiang, WANG Yiping. Fault diagnosis method based on extension rule based reasoning [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(3): 506-513. (in Chinese)
- [15] 段荣行, 董德存, 赵时旻. 采用动态故障树分析诊断系统故障的信息融合法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 1699-1704.
DUAN Rongxing, DONG Decun, ZHAO Shimin. Information fusion method for system fault diagnosis based on dynamic fault tree analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(11): 1699-1704. (in Chinese)
- [16] 潘波, 黄领才, 姜同敏, 等. 服役飞机结构件腐蚀失效故障树分析及改进[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(3): 299-302.
PAN Bo, HUANG Lingcai, JIANG Tongmin, et al. Fault tree analysis of corrosion failure for aircraft structures and improvements [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(3): 299-302. (in Chinese)
- [17] 何旋. 基于动态故障树的钻井泵故障诊断专家系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
HE Xuan. Design and implementation of drilling pump fault diagnosis expert system based on dynamic fault tree [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [18] ASD. International specification for technical publications utilizing a common source database S1000D [S]. US: ASD, 2012.

作者简介:

柯倩云(1989—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空类故障隔离手册。

涂志琦(1970—),女,硕士,研究员。主要研究方向:技术出版物顶层策划。

刘亚奇(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空类技术出版物。

(编辑:马文静)