

无人机健康诊断知识库建立研究

何敏, 吕当侠, 朱明晨, 付磊, 严杰

(中航工业 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091)

摘要: 针对无人机健康诊断系统的设计, 研究了健康诊断专家知识库的建立方法; 介绍了基于规则的专家知识库的含义及其对无人机设计的要求, 阐述了故障树与故障模式判据表的形成方法; 故障树分析基于故障因果逻辑, 逐层找出故障事件的原因, 保证专家知识逻辑上的完备性; 故障模式判据表将抽象的专家知识具体化为多个能够在工程上应用的要素; 提出了一种故障树分析与故障判据规则相结合的建立健康诊断专家知识库的方法; 从某型大气数据系统的组成及原理出发, 以大气数据系统真空速失效为顶事件, 构造了故障树和故障模式判据表; 结果表明, 结合故障树和故障模式判据表格构造的专家知识库清晰、简洁, 具有很高的工程实用价值, 能够应用于无人机健康诊断系统的设计。

关键词: 健康诊断; 专家知识库; 故障树; 故障判据

Research on Building of UAV Health Diagnosis Knowledge Base

He Min, Lü Dangxia, Zhu Mingchen, Fu Lei, Yan Jie

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

Abstract: The way of building health diagnosis knowledge base is researched for designing health diagnosis system of UAV. The significance of expert knowledge base and its demand for UAV is introduced. The method building fault tree and criterion table of failure mode is explained. Fault tree analysis can ensure expert knowledge to be complete in logic by finding reasons of event layer-to-layer through cause-and-effect logic. Criterion table of failure mode translate expert knowledge to several elements that can be used in engineering. A method combining fault tree analysis with fault criterion rules is proposed to build health diagnosis knowledge base. The composition and principle of certain Air Data System are introduced. Then taking true airspeed failure of Air Data System as a top event, fault tree and criterion table of failure mode are constructed. The result indicated that expert knowledge base which is described through fault tree and criterion table of failure mode is clear and succinct. The method can apply to design health diagnosis system for UAV and has practical feasibility in engineering application.

Keywords: health diagnosis; expert knowledge base; fault tree; fault criterion

0 引言

大型无人机的构型复杂, 系统紧凑, 子系统相互交联, 可靠性工作要求极高。为了保证每次安全正常飞行, 无人机平台的健康诊断系统的研究成为关键问题。无人机健康诊断系统的设计主要包含两个目的: 1) 在新机型各个设备或子系统的设计阶段就考虑其在使用阶段的故障诊断和处置; 2) 为提高机载系统安全性、完好性和飞行平台任务成功性提供一个实用性较强的监测手段。

随着现代科技发展, 各个领域都在建立自己领域的健康诊断系统。健康诊断方法主要有基于信号处理的诊断、基于解析模型的诊断、和基于知识的诊断^[1]。基于知识的诊断可以充分的利用专家的经验, 比较适合复杂装备系统的分析和研究。曹文远针对波音 747 飞机的 PW4000 发动机的故障诊断问题, 设计了基于神经网络的故障诊断专家系统^[2]。常琦研究了基于飞机典型结构系统的健康监测、诊断与管理问题^[3]。李国胜针对民航飞机的空中交通警戒与防撞系统 (TCAS), 建立了一套故障诊断专家系统, 实现了对 TCAS 故障的诊断, 降低了维修成本^[4]。刘江将基于规则的故障诊断专家系统与故障树分析法相结合, 研究了通用航空器故障诊断专家系统^[5]。

国内基于规则的健康诊断专家系统最突出弱点是专家知识库的建立。因此, 寻求简洁、有效、通用的专家知识库建立方法一直是科技人员的研究热点。本文详细阐述了专家知识库的建立过程, 包括故障树与故障模式判据表格的形成, 并以大气数据系统为例, 建立了健康诊断专家知识库。

1 专家知识库简介

无人机系统的专家知识库是以无人机系统参数信息为基础、无人机全系统工作原理为依据建立飞行平台上各个故障模式判据的集合。

通过对以往飞机出现故障现象时的排故程序和进行经验进行分析研究, 按故障产生机理的层次, 建立相应的故障模式判定故障树; 并根据系统工作原理以及故障模式判定故障树建立能被健康诊断系统识别的数学模型, 即专家知识库中的判据数学公式。通过该方法实现基于规则的故障诊断系统的专家知识库的建立。

建立健康诊断专家知识库需要无人机系统的设计符合三点要求: (1) 采用三级维修体制 (即基地级、中继级、基层级) 进行飞行平台的设计; (2) 无人机系统的机载设备均实现了机内测试 (BIT) 设计; (3) 无人机的航电系统采用总线体制, 大部分系统都可以用相应的参数信息表达其工作情况。

2 专家知识库的建立方法

健康诊断专家知识库的众多要素中最为关键的要素是故障

收稿日期: 2015-11-06; 修回日期: 2015-12-18。

作者简介: 何敏 (1964-), 男, 陕西岐山人, 副总工程师, 主要从事飞机总体设计方向的研究。

树与故障判据数学公式的形成。这两项要素集合了设计人员的智慧与经验。

2.1 故障树的形成

根据系统工作原理结构逻辑而建立的，用来表明产品某些部分的故障、外界事件或它们的组合将导致产品发生一定故障的逻辑图叫做故障树。它是一种倒立的树形结构，从一组无次序、无规律的事例中推理出树状形式表示的分类规则。故障树是一种逻辑因果关系图，构图的元素是事件和逻辑门。图中的事件用来描述系统和元、部件故障的状态，逻辑门把事件联系起来，表示事件之间的逻辑关系。

无人机上各个机载设备为一个独立单元 LRU（即可在工作现场（基层级）从无人机飞行平台上拆卸并更换的单元，又叫做外场可更换单元。），各个 LRU 都是由几个 SRU（即可从 LRU 上拆卸并更换的单元，又叫内场可更换单元。）组成。

对于层次简单的子系统，以一个子系统为顶事件，与此子系统对应的各个设备定义为中间事件、各个设备的 SRU 设定为底事件；对于复杂构型的子系统，以子系统内的部件为顶事件，部件内的各个 LRU 为中间事件，LRU 内的 SRU 为底事件。根据需求的不同，也可以子系统的功能模块作为顶事件，基于功能建立故障树。采用树来表述顶事件、中间事件、底事件之间逻辑关系的构型，详见图 1。图 1 中符号说明：为顶事件；为中间事件；为底事件；为逻辑“与”；为逻辑“或”；为逻辑“非”。

故障树中的节点代号包括顶事件、中间事件和底事件代号。顶事件用“T1、T2…”表示；一级中间事件用“A1、A2…”，二级事件用“B1、B2…”表示，依此类推；底事件用“X1、X2、X3…”表示；事件编号需按照从左至右的顺序编号，一个故障树中每个底事件必须是唯一的。

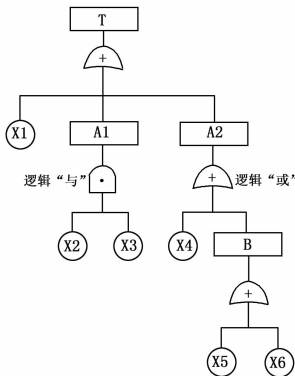


图 1 故障树示例

2.2 故障模式判据表的形成

故障树形成后，需对故障树中划分的各个事件的知识进行丰富，形成可供健康诊断系统使用的信息，即故障模式判据表。故障模式判据表包含的信息有故障代码、故障名称、参数来源、故障判据描述、数学模型（故障判据数学公式）、判据参数说明、显示参数（与故障相关的参数，供飞行员或地勤参考）、处置建议（飞行任务中的处置应参照《飞行员操作手册》，地面处置为排故措施建议）等。

参数来源是指故障诊断使用的参数的获得途径，对于无人机系统，一般有 3 种：航前诊断通过综检车获得参数，航时诊断通过测控链路获得参数，航后诊断通过飞参记录的数据获得

参数。

为方便健康诊断系统使用，故障判据数学公式采用逻辑符号表达，基本逻辑符号定义见表 1。

表 1 基本逻辑符号定义

判据中逻辑符合	逻辑含义
. AND.	与
. OR.	或
!	非

3 健康诊断专家知识库建立示例

采用前述的方法，以某型无人机上大气数据系统真空速失效为例，说明专家知识库的建立过程。某型无人机上大气数据系统由直杆型总、静压受感器、L 型总、静压受感器、总温传感器、大气数据计算机 1、大气数据计算机 2 和总、静压管路组成。系统感受飞机总压、静压、总温、攻角、侧滑角，解算得出无人机飞行平台其他系统所需要的各种大气参数，通过 RS-422 总线将这些参数输出。其中 L 型总、静压受感器及大气数据计算机 2 作为备份。大气数据系统组成见表 2，系统原理框图见图 2。

表 2 大气数据系统成品

序号	名称	数量
1	大气数据计算机 1	1 台
2	大气数据计算机 2	1 台
3	直杆型总、静压受感器	1 个
4	L 型总、静压受感器	1 个
5	总温传感器	1 个
6	总静压管路系统	1 套

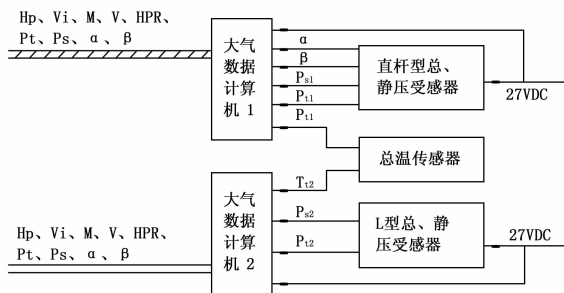


图 2 大气数据系统原理框图

根据上述工作原理，建立大气数据系统真空速失效模式判据树及失效模式判据表，详见图 3 及表 3。

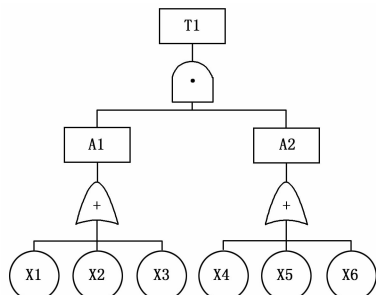


图 3 大气数据系统真空速失效模式判据树

表 3 大气数据系统真空速失效模式判据表

节点代号	故障名称	故障代码	分析数据对象	故障判据描述	判据公式	判据参数说明	相关参数	处置建议
T1	大气数据系统真空速失效	02	综检	无直接判据	无	无	无	无
		02	飞参	无直接判据	无	无	无	无
		02	测控	无直接判据	无	无	无	“建议转人工遥控”（参照《指挥员操作员使用手册》）
A1	ADC1 真空速失效	02.1	综检	连续 2 拍 ADC1 真空速有效位为 0	ADC1 真空速有效位 = 0. AND. N > 2	ADC1 真空速有效位见 ADC1 数据有效性标识; N 为满足条件的数据连续出现拍数。	无	无
		02.1	飞参	连续 2 拍 ADC1 真空速有效位为 0 或连续 2 拍真空速超出飞机允许速度范围	(ADC1 真空速有效位 = 0. AND. N1 ≥ 2) .OR. (ADC1 真空速 > 700km/h. AND. N2 ≥ 2)	“ADC1 真空速有效位”见 ADC1 数据有效性标识; “ADC1 真空速”见飞参数据第 1、第 3 副帧; N1、N2 为满足条件的数据连续出现拍数。	INS 地速 (由 INS 东向速度和 INS 北向速度合成, 单位为 km/h), GPS 地速 (由 GPS 东向速度和 GPS 北向速度合成, 单位为 km/h), ADC2 真空速 (飞参数据第 2、第 4 副帧)	无
		02.1	测控	连续 2 拍 ADC1 真空速超出飞机允许速度范围	((真空速选择 = 0. AND. 主帧真空速 > 700km/h) .AND. N1 ≥ 2) .OR. (真空速选择位 = 1. AND. 副帧真空速 > 700km/h) .AND. N2 ≥ 2)	“真空速选择”见测控 84 副帧; “副帧真空速”见测控 8C 副帧; N1、N2 为满足条件的数据连续出现拍数。	地速 (由 INS 东向速度和北向速度合成, 单位为 km/h), 真空速选择位, 副帧真空速, 主帧真空速	提示 “ADC1 真空速失效”
A2	ADC2 真空速失效	02.2	综检	连续 2 拍 ADC2 真空速有效位为 0	ADC2 真空速有效位 = 0. AND. N > 2	“ADC2 真空速有效位”见 ADC2 数据有效性标识; N 为满足条件的数据连续出现拍数。	无	无
		02.2	飞参	连续 2 拍 ADC2 真空速有效位为 0 或连续 2 拍真空速超出飞机允许速度范围	(ADC2 真空速有效位 = 0. AND. N1 ≥ 2) .OR. (ADC2 真空速 > 700km/h. AND. N2 ≥ 2)	“ADC2 真空速有效位”见 ADC2 数据有效性标识; “ADC2 真空速”见飞参数据第 1、第 3 副帧; N1、N2 为满足条件的数据连续出现拍数。	地速 (由 INS 东向速度和北向速度合成, 单位为 km/h), ADC1 真空速 (飞参数据第 1、第 3 副帧), ADC2 真空速 (飞参数据第 2、第 4 副帧)	无
		02.2	测控	连续 2 拍 ADC2 真空速超出飞机允许速度范围	((真空速选择 = 1. AND. 主帧真空速 > 700km/h) .AND. N1 ≥ 2) .OR. (真空速选择位 = 0. AND. 副帧真空速 > 700km/h) .AND. N2 ≥ 2)	“真空速选择”见测控 84 副帧; “副帧真空速”见测控 8C 副帧; N1、N2 为满足条件的数据连续出现拍数。	地速 (由 INS 东向速度和北向速度合成, 单位为 km/h), 真空速选择位, 副帧真空速, 主帧真空速	提示 “ADC2 真空速失效”
X1	ADC1 故障	02.1.1	综检	连续 2 拍 ADC1 故障标识中 ADC1 故障位为 0	ADC1 故障位 = 0. AND. N1 ≥ 2	“ADC1 故障位”见综检接收飞控数据单数帧中大气机故障标识	ADC1 故障位	更换 ADC1

续表

节点代号	故障名称	故障代码	分析数据对象	故障判据描述	判据公式	判据参数说明	相关参数	处置建议
		02.1.1	飞参	连续 2 拍 ADC1 故障标识中 ADC1 故障位为 0	$ADC1 \text{ 故障位} = 0. \text{AND. } N1 \geq 2$	“ADC1 故障位”见飞参数据第 1 副帧中 ADC1 状态字	ADC1 故障位	更换 ADC1
		02.1.1	测控	连续 2 拍 ADC1 故障标识中 ADC1 故障位为 0	$ADC1 \text{ 故障位} = 0. \text{AND. } N1 \geq 2$	“ADC1 故障位”见测控 89 副帧 1 号大气机	ADC1 故障位	提示“ADC1 故障”
X2	直杆型总静压受感器管路堵塞	02.1.2	无	人工检查	无	无	无	直杆型总静压受感器加温功能检查、动静压试验。更换故障件或疏通管路。
X3	总温传感器故障 1	02.1.3	综检	ADC1 故障标识中总温传感器故障位为 0	ADC1 总温传感器故障位=0	“ADC1 总温传感器故障位”见综检接收飞控数据单数帧中大气机故障标识	ADC1 总温传感器故障位	更换总温传感器
		02.1.3	飞参	ADC1 故障标识中总温传感器故障位为 0	ADC1 总温传感器故障位=0	“ADC1 总温传感器故障位”见飞参数据第 1 副帧中 ADC1 故障标识		更换总温传感器
		02.1.3	测控	无	无	无		无
X4	ADC2 故障	02.2.1	综检	连续 2 拍 ADC2 故障标识中 ADC1 故障位为 0	$ADC2 \text{ 故障位} = 0. \text{AND. } N1 \geq 2$	“ADC2 故障位”见综检接收飞控数据双数帧中大气机故障标识	ADC2 故障位	更换 ADC2
		02.2.1	飞参	连续 2 拍 ADC2 故障标识中 ADC1 故障位为 0	$ADC2 \text{ 故障位} = 0. \text{AND. } N1 \geq 2$	“ADC2 故障位”见飞参数据第 3 副帧中 ADC2 状态字	ADC2 故障位	更换 ADC2
		02.2.1	测控	连续 2 拍 ADC2 故障标识中 ADC1 故障位为 0	$ADC2 \text{ 故障位} = 0. \text{AND. } N1 \geq 2$	“ADC2 故障位”见测控 89 副帧 2 号大气机	ADC2 故障位	提示“ADC2 故障”
X5	L 型总静压受感器管路堵塞	02.2.2	无	人工检查	无	无	无	L 型总静压受感器加温功能检查、动静压试验。更换故障件或疏通管路。
X6	总温传感器故障 2	02.2.3	综检	ADC2 故障标识中总温传感器故障位为 0	ADC2 总温传感器故障位=0	“ADC2 总温传感器故障位”见综检接收飞控数据双数帧中大气机故障标识	ADC2 总温传感器故障位	更换总温传感器
		02.2.3	飞参	ADC2 故障标识中总温传感器故障位为 0	ADC2 总温传感器故障位=0	“ADC2 总温传感器故障位”见飞参数据第 3 副帧中 ADC2 故障标识	ADC2 总温传感器故障位	更换总温传感器
		02.2.3	测控	无	无	无	无	无

4 结束语

本文从专家知识概念入手，详细阐述了健康诊断知识库的建立过程，工程应用性强。基于故障树与故障模式判据表相结合的描述的专家知识库描述方法清晰、简洁，健康诊断系统使用其专家知识库，就可以将以往设计阶段的故障模式分析报告等技术资料智能化的带给用户，同时给智能维修保障系统提供维修输入。

参考文献：

- [1] 李向前. 复杂装备故障预测与健康管理的不研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [2] 曹文远. 基于神经网络的飞机故障诊断专家系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [3] 常琦. 基于知识的结构健康管理系统关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [4] 李国胜. TCAS 故障诊断专家系统的设计与研究 [D]. 天津: 中国民用航空飞行学院, 2009.
- [5] 刘江. 基于故障树的通用航空器故障诊断专家系统研究 [D]. 天津: 中国民用航空飞行学院, 2011.