

引气系统建模及传感器集优化分析

Optimizing Analysis of Bleed Air System Modeling and Sensor Set

李海伟 / Li Haiwei

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

MADe(维修感知设计环境)是基于功能流模型、系统失效知识和测试信息的系统测试性与健康感知综合仿真分析工具。给出了功能流模型定义及其建模流程,详细分析了飞机引气系统的工作模式、层次结构、功能流及典型部件的物理失效过程,并实现了引气系统典型工况的建模。基于引气系统功能流模型和功能流传播表对传感器集进行了优化,包括传感器集的选择和诊断规则分析。仿真结果表明,该方法能有效地实现引气系统的建模,实现引气系统故障诊断与健康监控方案的优化。

关键词:功能流模型;建模仿真;引气系统;维修感知设计环境

中图分类号:V245.4

文献标识码:A

[Abstract] Maintenance Aware Design Environment (MADe) is an integrated simulation tool used for system testability and health monitoring analysis based on function flow model, system failure knowledge and test information. The definition of function flow model and modeling process are presented. The aircraft bleed air system is analyzed including working modes, hierarchy, function flows and physical failure process for typical component. The model of bleed air system is achieved under typical work condition. Based on the system model and the propagation feature of function, the sensor sets are simulated and analyzed, including the selection of sensor set and diagnostic rules analysis. The simulation results show that the simulation method can be used for bleed air system modeling effectively, and it contributes to the optimization of health monitoring and fault diagnosis for aircraft bleed air system.

[Key words] function flow model; modeling and simulation; bleed air system; Maintenance Aware Design Environment (MADe)

0 引言

传统飞机设计更多地侧重于功能实现,缺乏测试性设计,但随着飞机系统复杂度的增加、维修理念的转变和状态监控及健康管理技术的进步,对飞机系统的测试性提出了更高要求。根据航空公司运营经验,飞机引气系统故障发生频率高,排故时间长、难度大,若对引气系统工作原理缺乏深入认识,不能准确定位故障件,只是盲目更换故障件,不仅耗费资源,增加维护成本,甚至影响飞行安全,因而对引气系统进行有效的测试性设计十分必要^[1]。

为了在早期设计阶段评估和优化飞机系统和

设备的测试性,采用物理样机和半物理样机的仿真方法成本过于昂贵,且难以与系统设计同步进行,而基于模型的测试性仿真分析方法,不仅费用少,且可与设计并行开展,优势和效果十分明显。目前,根据方法所依赖模型的不同,基于模型的测试性仿真工具有多种^[2-6],针对飞机引气系统的研究也取得了不少进展,尤其在建模仿真和故障诊断方面^[3-5],但基于功能流模型的引气系统建模仿真研究还较少。MADe 是基于功能流模型、系统失效知识和测试信息的复杂系统测试性与健康感知设计优化工具^[6],本文基于 MADe 对民用飞机引气系统进行建模与功能流仿真分析。

1 功能流模型及建模流程

1.1 功能流模型

功能流模型是基于系统结构组成单元、功能流,以分层有向图的形式描述系统功能、功能流与组成单元及其相互连接关系,并通过定义系统组成单元与功能、功能与功能流、功能流与单元寿命周期内物理失效过程,及功能流与测试之间的因果关系或关联关系来表征系统与功能流之间、功能流失效模式与测试之间的相关性的一种模型表示方法。简而言之,功能流模型由以下要素组成:

(1) 有限的系统组成单元集: $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, 其中, 单元 c_m 可被赋予系统、子系统、部件和零件 4 类层次标签, 层次等级依次递减, 同一或较低层次的单元只能作为较高层次单元的子单元。

(2) 有限的系统组成单元功能和功能流集: $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, $f_k = (fl_1, fl_2, \dots, fl_j)$, $fl_j = (fl_{j1}, fl_{j2}, \dots, fl_{jr})$, 每个功能 f_k 包含一个或多个功能流 fl_j , 每个功能流 fl_j 拥有多个功能流属性 fl_{jr} , 且 $fl_{jr} \in \{ef, mf, sf\}$ 。其中, F 表示功能集, 功能流划分为 3 类, ef 表示能量流, mf 表示物质流, sf 表示信号流。对于单元 c_m 的功能流, 有 $fl_j^m \in \{fl_{in}^m, fl_{out}^m\}$, $fl_{in}^m \xrightarrow{c} fl_{out}^m$, $c = (p, cs)$, 其中, fl_{in}^m 表示单元 c_m 的输入功能流, fl_{out}^m 表示单元 c_m 的输出功能流, c 表示单元 fl_{in} 与 fl_{out} 之间的因果连接关系, p 表示连接极性 (默认为 + 或 -), cs 表示因果连接强度 (默认值为 1 ~ 10), fl_{in}^m 与 fl_{out}^m 的功能流属性可不同, 而不同单元之间的功能流连接关系均为关联关系, 且功能流属性必须相同。

(3) 有限的测试集: $T = \{t_1, t_2, \dots, t_l\}$, 且有 $t_l \in \{b, s\}$, 其中, T 表示测试集, b 表示机内测试, s 表示传感器。

(4) 有向图 $DG = \{C, T, E\}$, 其中, E 表示系统内的物理连接, 即功能流之间的因果连接和关联连接。

1.2 建模流程

建模所需数据包括系统描述文档、接口控制文件、FMECA、失效机理、传感器和 BIT 设计数据等。功能流模型属于层次化静态模型, 每一个模型只能对应一种工作模式, 因此需梳理出系统所有的工作模式, 逐个工作模式进行建模。建模前需对模型的层次进行约定, 模型的层次也决定了系统所能分析到的详细程度。综合功能流建模各项要素和建模过程中所涉及的各项输入和工作内容, 基于 MADe

的建模流程如图 1 所示。

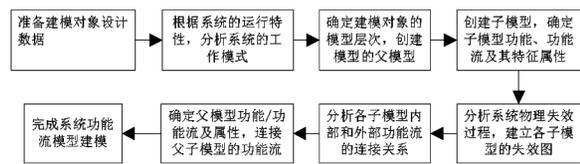


图 1 基于 MADe 的建模流程

2 引气系统建模

2.1 工作模式分析

根据引气系统的工作原理及飞机运行工况^[3], 分析得到引气系统的 10 个工作模式, 如表 1 所示。其中, 第 3、4 种工作模式属于单引气的情况, 发生的概率均低于 10^{-9} , 发生概率较小。

表 1 引气系统工作模式

序号	工作模式
1	交输引气阀门关闭, 分别从左右发动机中压级引气
2	交输引气阀门关闭, 分别从左右发动机高压级引气
3	交输引气阀门关闭, 从 APU 单边引气
4	交输引气阀门关闭, 从高压地面气源单边引气
5	交输引气阀门打开, 左引气关闭, 从右发动机中压级引气
6	交输引气阀门打开, 左引气关闭, 从右发动机高压级引气
7	交输引气阀门打开, 右引气关闭, 从左发动机中压级引气
8	交输引气阀门打开, 右引气关闭, 从左发动机高压级引气
9	交输引气阀门打开, 左右引气关闭, 从高压地面气源引气
10	交输引气阀门打开, 左右引气关闭, 从 APU 引气

本文针对引气系统的某一典型工况, 即第 2 个工作模式进行建模。

2.2 系统组成单元及约定层次

引气系统约定为三个层次: 系统、子系统和部件。当引气系统处于第 2 个工作模式时, 闭合的交输引气阀门将引气系统隔离成左右两套引气系统, 二者的组成单元与功能基本相同, 本文只考虑对左引气系统进行建模, 如图 2 所示。

2.3 功能及功能流分析

功能分为 9 大类: (1) 分支; (2) 输送; (3) 连接; (4) 控制; (5) 转换; (6) 提供; (7) 信号; (8) 停止; (9) 支撑。此外, 每个功能大类还细分为多个子功

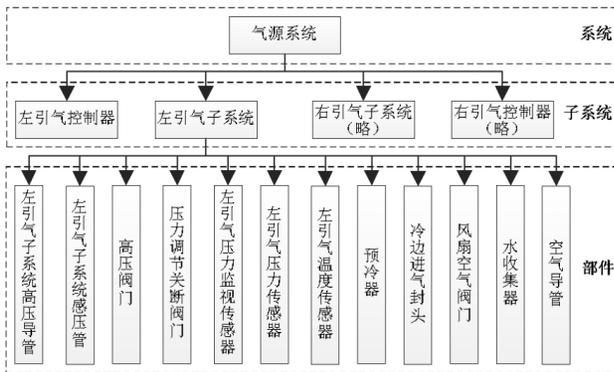


图2 引气系统组成及约定层次

能类^[6],而每个功能均包含多个功能流。通过分析引气系统各部件所发挥的实际作用,参照标准功能分类,得到左引气系统及其各部件的功能。部件中,阀门的功能为控制,可控制引气的流动方向和气压值;导管的功能为输送,作为引气输送的载体将引气送往终端用气环节;气压和温度传感器的功能为转换,可将压力和温度转换为电信号送至引气控制器。左引气子系统的功能为提供,为飞机各用气终端提供合适压力和温度的空气;左引气控制器的功能为控制,实时处理传感器和总线送来的数据和控制指令。

功能流分为3类:能量流、物质流和信号流,每类功能流还细分多个子功能流类,每个功能流可定义多个属性^[6]。每个功能流属性为可表征该功能

的一项特征参数,如流率、气压和温度等,通过定义特征参数的三态值(即高、低和正常),可得到功能流的失效模式(即变高或变低)。左引气系统组成单元的功能、功能流及其属性示例如表2所示,左引气子系统模型示例如图3所示。

表2 左引气系统的功能、功能流及属性(部分)

组成单元	功能	功能流及属性			
		输入功能流	功能流属性	输出功能流	功能流属性
高压导管	输送	高压引气输入 ²	流率;气压;温度	高压引气输出 ²	流率;气压;温度
左引气压力监视传感器	转换	引气输入 ²	气压	引气压力信号 ³	幅值
左压力调节关断阀	调节	供电 ¹	电压	左引气输出 ²	流率;气压;温度
		左引气输入 ²	流率;气压;温度		
		下游感压输入 ²	气压	左压力调节关断阀门状态 ³	幅值
左引气压力传感器	转换	引气输入 ²	气压	引气压力信号 ³	幅值
左引气温度传感器	转换	引气输入 ²	温度	引气温度信号 ³	幅值
.....

注:“1”表示能量流,“2”表示物质流,“3”表示信号流。

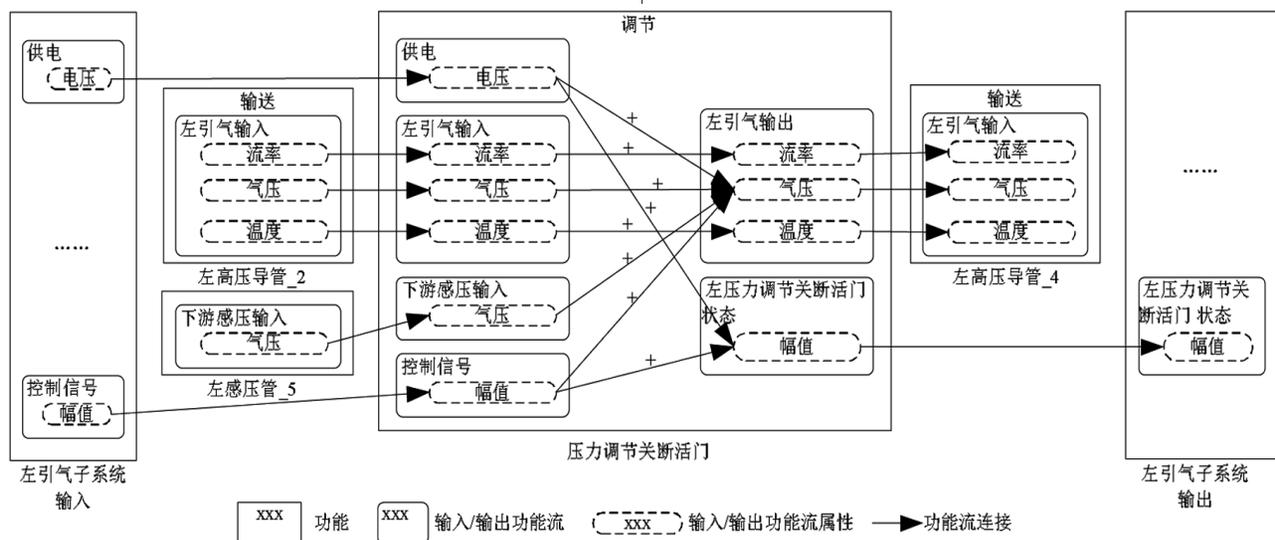


图3 左引气系统功能流连接示例

2.4 功能流连接分析

功能流连接分为2类:(1)单元内部输入功能流与输出功能流之间的因果连接;(2)同一层次的

不同单元、不同层次的部件、子系统和系统单元功能流之间的关联连接。关联连接仅表示功能流之间的相关性关系,因果连接则包含连接极性和因果

强度。若输出功能流与输入功能流成正比则极性为正,否则为负。因果强度表示输出功能流受输入功能流影响而上下波动的程度。左引气系统功能流连接示例如图3所示,压力调节关断阀门功能为调节,其内部功能流的因果连接极性均为正;压力调节关断阀门与同一层次模块(即左高压导管_2、左高压导管_4和左感压管_5)功能流的关联连接,及压力调节关断阀门与父模块(即左引气子系统)功能流的关联连接,均无极性。

2.5 失效图分析

在飞机早期设计阶段,系统的失效是基于功能流输出的偏离(如变高或变低)。失效图是以有向图的形式给出导致部件功能失效的事件序列树,事件节点包含失效原因、失效机理、故障及损失/征兆等,节点之间是具有因果极性与强度的有向连接。

图4所示为左引气系统左高压导管_2遭受腐蚀作用的失效图,图中可看出导致高压导管腐蚀的失效原因(三角形)、失效机理(菱形)、故障(深色圆形)和损失/征兆(上排浅色圆形),以及功能流失效模式(下排浅色圆形)。

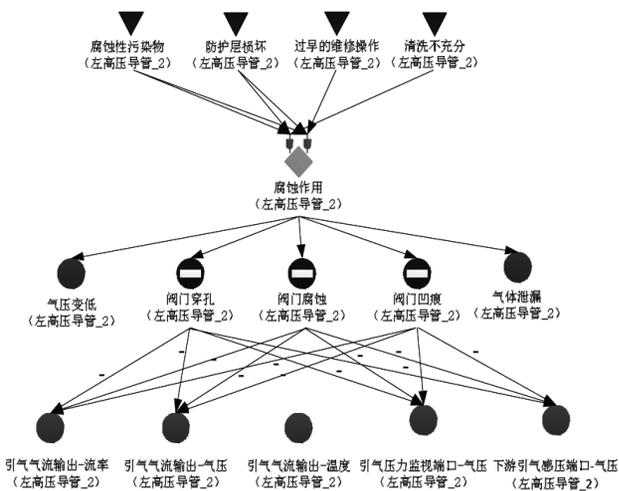


图4 左引气系统高压导管腐蚀失效图

通过上述分析,自底向上完成左引气子系统和左引气控制器的层次结构、功能流及失效图分析,进而实现左引气系统建模,图5所示为左引气系统的左引气子系统模型。

3 传感器集优化分析

左引气系统控制器由内置 BIT 完成设备的状态监控与自检,左引气子系统则由压力、温度和引气泄漏探测传感器完成状态监控。左引气子系统传

Name	Sensed ...	# o...	Coverage	POD	Co...	C...	Cost	Weight
Common Test F	4 / 49	4	85.37%	Unknown	¥105...	¥0.00	¥3,4...	4.851b
Sensor Set 1	4 / 52	4	93.5%	Unknown	¥105...	¥0.00	¥3,4...	4.851b
Sensor Set 2	4 / 52	4	93.5%	Unknown	¥105...	¥0.00	¥3,4...	4.851b
Sensor Set 3	5 / 52	5	93.5%	Unknown	¥106...	¥0.00	¥3,5...	5.951b
Sensor Set 4	5 / 52	5	93.5%	Unknown	¥111...	¥0.00	¥3,9...	6.171b
Sensor Set 5	5 / 52	5	93.5%	Unknown	¥111...	¥0.00	¥3,9...	6.171b
Sensor Set 6	6 / 52	6	93.5%	Unknown	¥112...	¥0.00	¥4,0...	7.281b
Sensor Set 7	4 / 52	4	93.5%	Unknown	¥105...	¥0.00	¥3,4...	4.851b
Sensor Set 8	4 / 52	4	93.5%	Unknown	¥105...	¥0.00	¥3,4...	4.851b
Sensor Set 9	5 / 52	5	93.5%	Unknown	¥106...	¥0.00	¥3,5...	5.951b
Sensor Set 10	5 / 52	5	93.5%	Unknown	¥111...	¥0.00	¥3,9...	6.171b
Sensor Set 11	5 / 52	5	93.5%	Unknown	¥111...	¥0.00	¥3,9...	6.171b
Sensor Set 12	6 / 52	6	93.5%	Unknown	¥112...	¥0.00	¥4,0...	7.281b

图5 左引气子系统传感器集组

感器集的优化分析是基于功能流模型分析给出的功能流传播表,该表给出了功能失效的传播路径以及各系统功能流属性的影响。通过优化算法对传播表内各个功能失效的定性特性进行处理,并根据功能分析和功能流属性确定监测特定故障的传感器类型,分析得到传感器集。如图5所示,通过功能流传播分析,可知左引气子系统存在12个不同的传感器布局解决方案,需要52个测试点,传感器集1建议的测试点位置如图6所示。通过对传感器集进行测试性分析,可得到传感器集对应的覆盖率、模糊组和诊断集等,如传感器集1所对应的功能失效覆盖率为93.5%,模糊组有三个,分别为:(1)模糊组1:{左压力调节关断阀门-左引气气流输出-Static pressure 变低;左感压管_5-气流-Static pressure 变低;左高压导管_3-下游感压端口-Static pressure 变低};(2)模糊组2:{左压力调节关断阀门-左引气气流输出-Static pressure 变高;左感压管_5-气流-Static pressure 变高;左高压导管_3-下游感压端口-Static pressure 变高};(3)模糊组3:{左高压阀门-高压气流输出-Static pressure 变低;左感压管_2-气流-Static pressure 变低}。

传感器集所对应的诊断集有助于故障的识别,左引气系统的排故通过与故障紧密相关的特征参数的测试来实现。

图7所示为左引气子系统采用传感器集1方案时,左压力调节关断阀门卡在中间位的诊断规则。

根据传感器的属性,如传感器成本、重量、传感器监测运行费用(每小时)、系统监测运行费用(每小时)和检测概率等属性,以及传感器集的综合特性,如可靠性、传感器数量、覆盖率、检测概率等,可生成多个传感器集的雷达图,形象地给出不同传感器集方案的对比情况,便于快速地确定传感器集的优化和选择方案。

(下转第96页)

4 结论

在遥测传输卫星地面站应用集中监控技术,监控软件运行在工业控制计算机平台上,通过网络对卫星地面站各设备进行监控,电源控制器负责对各设备进行开启与关闭,在监控软件上可以实现参数配置、实时状态监控以及温湿度报警等,大大提高了系统的自动化程度。工程技术人员只需轻松地在机房的控制台对卫星地面站进行集中控制与管理,大大提高了工作效率;同时,给卫星地面站机房管理带来便捷。另外,机房能长期保持在良好稳定的运行环境下,给遥测传输卫星地面站的运行维护

节省了大量的成本。

参考文献:

- [1] 于斌,帕孜来·马鑫木提,李新勤. 卫星地面站计算机监控系统[J]. 计算机应用,2002,02:86-88.
- [2] 井庆丰. 微波与卫星通信技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 542 广播电视卫星地球站. 卫星地球站上行设备监控系统[C]//国家广播电影电视总局科技司、国家广播电影电视总局安全播出调度指挥中心. 第六届全国广播电视地球站技术交流论文集. 北京:国家广播电影电视总局科技司、国家广播电影电视总局安全播出调度指挥中心,2004,6.

(上接第 54 页)

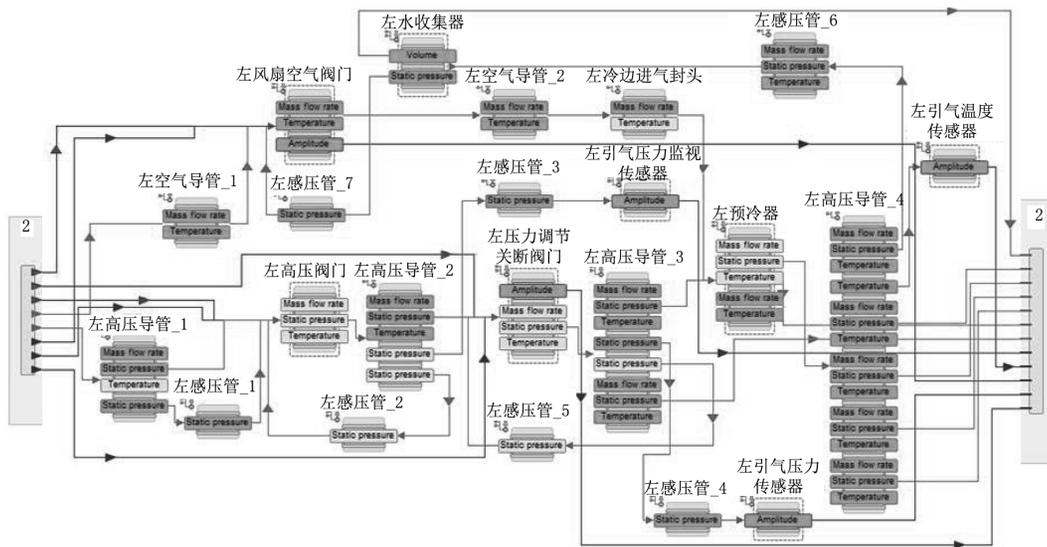


图 6 左引气子系统模型及传感器集 1 布局方案

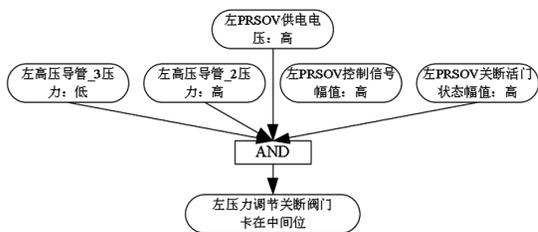


图 7 传感器集方案的诊断规则

4 结论

本文基于功能流模型及建模流程对飞机引气系统进行了详细建模和功能流仿真分析,基于引气系统模型对左引气子系统的传感器集布局方案和诊断规则进行了优化仿真分析,实现了基于功能流模型的飞机引气系统建模及其传感器集的选择与优化分析。

参考文献:

- [1] 何永勃,杨燕辉. 飞机引气系统的建模与故障仿真[J]. 计算机应用与软件,2013,30(10):220-222,303.
- [2] 张勇,邱静,刘冠军. 测试性模型对比展望[J]. 测试技术学报,2011,25(6):504-514.
- [3] 邓君香. 波音 737-700/800 型飞机发动机引气系统及其故障分析[J]. 航空维修与工程,2007,5:50-51.
- [4] 夏斌,孟柯生. 基于模糊理论的民用飞机引气系统故障诊断方法研究[J]. 航空维修与工程,2013,3:44-45.
- [5] 何永勃,王丽哲,杨燕辉. 采用 CBR 的飞机引气系统故障诊断研究[J]. 现代制造工程,2013,3:110-114.
- [6] Andrew Hess, Jacek S. Stecki, Shoshanna D. Rudov - Clark. The Maintenance Aware Design environment: Development of an Aerospace PHM Software Tool[Z]. 2008.