

# 基于 DFT 的飞机电源网络化故障诊断方法

黄政庭, 王仲生

(西北工业大学航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 针对目前飞机恒速恒频交流(CSCF-AC)电源系统故障诊断方法中存在的虚警率高、信息不能共享等问题, 提出一种基于动态故障树(DFT)的 CSCF-AC 电源系统网络化故障诊断方法。通过在普通布尔算子中引入 BEFORE 算子, 对 CSCF-AC 电源系统动态故障树进行定性分析, 得到系统的失效模式, 在此基础上建立一个包括机内自检、地面诊断和远程专家诊断在内具有三层结构的网络化故障诊断系统。实验结果表明, 该方法有效可靠, 具有一定的工程实用性。

**关键词:** 动态故障树; 飞机电源系统; 故障诊断; BEFORE 算子

## Networked Fault Diagnosis Method of Aircraft Power Supply Based on Dynamic Fault Tree

HUANG Zheng-ting, WANG Zhong-sheng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**【Abstract】** Aiming at the defects of the fault diagnosis in aircraft Constant Speed Constant Frequency Alternation Current(CSCF-AC) power supply, this paper proposes a new diagnosis method based on the Dynamic Fault Tree(DFT) and network. By adding a new operator BEFORE to the usual Boolean operators in the qualitative analysis of the DFT, this method provides a complete qualitative description of the system, and that any failure distribution can be accommodated. Then a 3-layer networked diagnosis system, which includes built-in test equipment in aircraft, diagnosis center on the ground, and remote experts from airlines, aircraft manufacturers or research institutes, is designed and developed. Experiments in the local area network show that the diagnosis method is effective and reliable, and the engineering effectiveness of the system is verified.

**【Key words】** Dynamic Fault Tree(DFT); aircraft power supply system; fault diagnosis; BEFORE operator

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.24.078

### 1 概述

飞机恒速恒频交流(CSCF-AC)电源主要由恒速传动装置和发电机组成, 也叫做组合传动发电机(Integrated Drive Generator, IDG), 是目前应用最多的一种飞机电源系统。

目前对 CSCF-AC 电源系统的故障检测主要有 2 种方式: 机内自检和地面检测。机内自检主要依靠机内自检设备对系统重要参数进行监测, 并能在系统出现故障时报警, 是飞机飞行过程中的主要检测措施。然而机内自检对故障的诊断过于粗略, 不能给出故障的具体部位和原因, 还存在虚警率高的问题。与机内自检相比, 地面检测虽然更加全面和精确, 但仍存在检测效率低、检测成本高以及检测设备不能共享等问题<sup>[1]</sup>。

针对以上问题, 本文提出一种基于动态故障树(Dynamic Fault Tree, DFT)的 CSCF-AC 电源系统故障诊断方法, 并建立网络化故障诊断系统。

### 2 动态故障树及 BEFORE 算子介绍

动态故障树是在传统静态故障树的基础上, 通过引入 PAND、FDEP、CSP、SEQ 等新的动态门来分析带有顺序失效特性的系统<sup>[2]</sup>, 割序则描述了系统发生失效时部件的动态行为, 求最小割序集是一种有效的动态故障树分析方法<sup>[3]</sup>。

BEFORE 算子的符号为“ $\triangleleft$ ”, 用于表示 2 个事件的失效顺序<sup>[4]</sup>, 例如  $a \triangleleft b$  表示 a 先于 b 失效。由此可得, 对于含有 2 个输入事件 A 和 B 以及一个输出事件 Q 的 PAND, 其代数表达式如下<sup>[5]</sup>:

$$Q=(A \cdot B) \cdot (A \triangleleft B) \quad (1)$$

且 BEFORE 算子满足以下 2 条运算法则:

$$a \cdot (a \triangleleft b) = a \triangleleft b \quad (2)$$

$$a \triangleleft (b + c) = (a \triangleleft b) \cdot (a \triangleleft c) \quad (3)$$

### 3 CSCF-AC 电源系统动态故障树的建立

根据故障危害性的大小和故障间的相互关系, 飞机电源系统故障诊断应按照一定的顺序进行, 例如过频和欠频故障能分别引起过压和欠压现象的发生, 但反之过压和欠压则未必会引起过频和欠频, 因此在诊断时要根据频率传感器的信号, 先判断是否发生了频率异常, 然后才能判定过压或欠压。

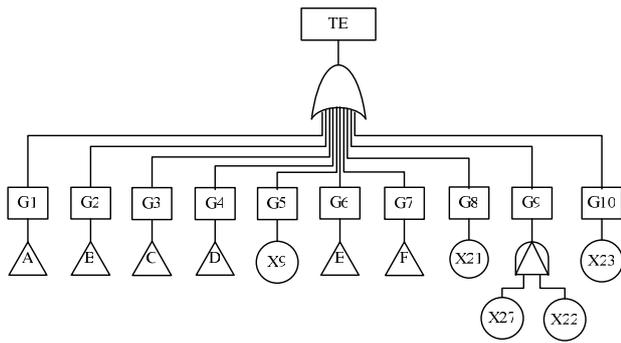
根据以上分析, 本文对 PAND 的定义稍作修改, 用于建立 CSCF-AC 电源系统动态故障树, 即 PAND 用来表示故障的诊断顺序, 而非故障发生的时间顺序。以 IDG 故障为顶事件建立故障树, 符号及说明如表 1 所示, 故障树如图 1 所示, 故障树代码及对应事件如表 2 所示。特别地, 故障树中的 X24~X27 分别是 G2、G3、G4、G7 的逆事件, 为了简化分析, 在计算时将其作为基本事件处理而不作展开。

表 1 IDG 故障树逻辑符号说明

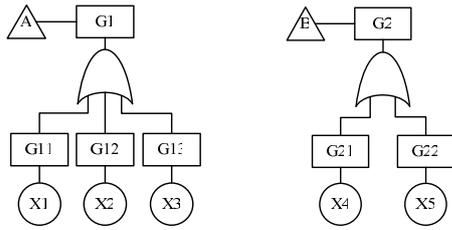
符号	事件	符号	事件
	与门(AND)		或门(OR)
	优先与门(PAND)		顶事件或中间事件
	基本事件		转移符号

**作者简介:** 黄政庭(1986—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 飞机故障诊断, 状态监控; 王仲生, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2011-06-21 **E-mail:** huangzhengting@sina.cn

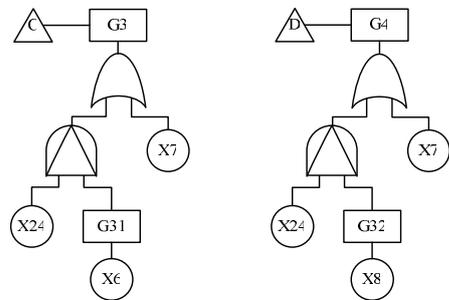


(a) IDG 动态故障树主树



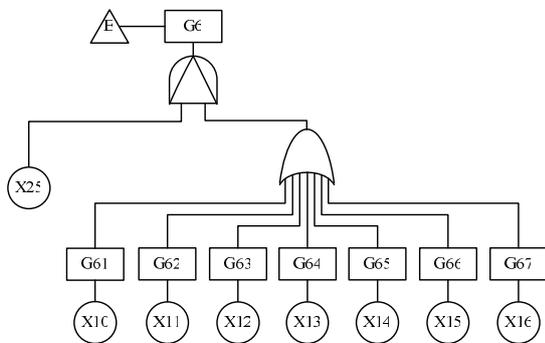
(b) G1 子树

(c) G2 子树

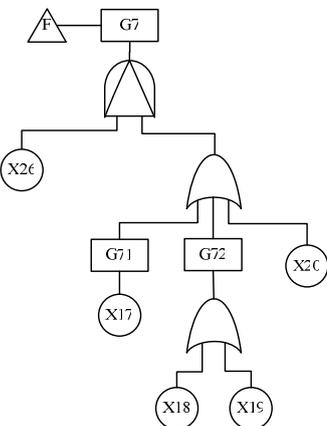


(d) G3 子树

(e) G4 子树



(f) G6 子树



(g) G7 子树

图1 IDG 动态故障树

表2 故障树代码及对应事件列表

代码	故障	代码	故障	代码	故障
TE	IDG 故障	G61	A 相过压, BC 相电流为 0	X10	BC 相开路
G1	过流	G62	B 相过压, AC 相电流为 0	X11	AC 相开路
G2	CSD 脱离故障	G63	AB 相过压, C 相电流为 0	X12	C 相开路
G3	过频	G64	C 相过压, AB 相电流为 0	X13	AB 相开路
G4	欠频	G65	AC 相过压, B 相电流为 0	X14	B 相开路
G5	频率调制	G66	BC 相过压, A 相电流为 0	X15	A 相开路
G6	过压	G67	三相过压	X16	调压器故障 (三极管短路)
G7	欠压	G71	三相电压全为 0	X17	三相开路
G8	电压调制	G72	欠励磁	X18	调压器故障 (三极管开路)
G9	IDG 温度高	X1	A 相短路	X19	旋转整流器故障
G10	PMG 纹波大	X2	B 相短路	X20	发电机卡阻
G11	A 相电流大于 3In	X3	C 相短路	X21	调压器性能变差或发动机转轴偏心
G12	B 相电流大于 3In	X4	滑油泄露或油路堵塞	X22	冷却系统异常或发电机内部摩擦过大
G13	C 相电流大于 3In	X5	CSD 卡阻或摩擦过大	X23	PMG 故障
G21	滑油压力低	X6	输入脱离装置故障	X24	CSD 未脱离
G22	滑油温度高	X7	CSD 调节器故障	X25	未发生过频故障
G31	发动机超速	X8	欠速保护开关故障	X26	未发生欠频故障
G32	发动机欠速	X9	调速器性能变差	X27	未发生欠压故障

4 故障树分析

图 1 所示故障树顶事件结构函数如下:

$$TE = \sum_{i=1}^{10} Gi \tag{4}$$

对于不含 PAND 的子树, 其结构函数为:

$$Gi = \sum_{i=1}^{13} Gi = \sum_{i=1}^3 Xi \tag{5}$$

同理可得 G2、G5、G8 和 G10 的函数表达式, 由于篇幅所限, 不一一列出。对于含有 PAND 的子树, 利用式(1)写出其结构函数, 再利用式(2)和式(3)对其化简, 得到最简形式, 例如:

$$G3 = (X24 \cdot G31) \cdot (X24 \triangleleft G31) + X7 = G31 \cdot (X24 \triangleleft G31) + X7 = X6 \cdot (X24 \triangleleft X6) + X7 \tag{6}$$

同理:

$$G4 = X8 \cdot (X24 \triangleleft X8) + X7 \tag{7}$$

$$G6 = (\sum_{i=10}^{16} Xi) \cdot \prod_{j=10}^{16} (X25 \triangleleft Xj) \tag{8}$$

$$G7 = (\sum_{i=17}^{20} Xi) \cdot \prod_{j=17}^{20} (X26 \triangleleft Xj) \tag{9}$$

$$G9 = X22 \cdot (X27 \triangleleft X22) \tag{10}$$

由于飞机电源系统故障属于小概率事件, 因此若在一个很短的时间内不考虑 2 个或 2 个以上的底事件同时发生, 则有:

$$G6 = \sum_{i=10}^{16} (Xi \cdot (X25 \triangleleft Xi)) \tag{11}$$

$$G7 = \sum_{i=17}^{20} (Xi \cdot (X26 \triangleleft Xi)) \tag{12}$$

将各子树结构函数代入式(4), 利用布尔代数运算法则中的幂等性质去掉重复项, 得到顶事件结构函数的标准形式为:

$$TE = \sum_{i=1}^5 (Xi) + X6 \cdot (X24 \triangleleft X6) + X8 \cdot (X24 \triangleleft X8) + X7 + X9 + \sum_{i=10}^{16} (Xi \cdot (X25 \triangleleft Xi)) + \sum_{i=17}^{20} (Xi \cdot (X26 \triangleleft Xi)) + X21 + X22 \cdot (X27 \triangleleft X22) + X23 \quad (13)$$

在该标准形式中, 每一个乘积项代表一个割集或割序集, 用  $CSS_i$  表示。再利用下式验证每一个  $CSS_i$ , 如果式子成立, 则表示该  $CSS_i$  冗余, 将其从事件结构函数标准形式中剔除:

$$CSS_i \cdot \sum_{j \neq i} CSS_j = CSS_i \quad (14)$$

经验证无冗余项, 因此, 式(13)即为 IDG 故障树顶事件结构函数的最小标准形式, 其中, 带“ $\triangleleft$ ”的项为最小割序集, 其余为最小割集。该式以代数的形式描述了系统的失效模式, 该方法用于动态故障树分析时, 可有效避免将故障树转化成马尔科夫链时产生的节点数目随基本事件数目的增多而呈爆炸性增长的问题。

基于以上分析, 本文提出以下 2 个检索规则:

- (1) 对于含有算子“ $\triangleleft$ ”的项, 其前后事件必须按顺序检索, 先检索“ $\triangleleft$ ”前的事件, 后检索“ $\triangleleft$ ”后的事件。
- (2) 对于不含算子“ $\triangleleft$ ”的项, 检索时无强制性顺序要求, 按事件重要度进行检索。

根据以上规则, 可确定 IDG 故障树事件的检索顺序。在 IDG 故障树中, 中间事件为故障发生时的现象, 底事件则是故障的具体原因。在诊断时, 按照由上至下、逐级分解的原则进行, 由故障现象推导故障原因, 并以此为原则设计诊断算法。根据前面分析, 由于飞机电源系统故障为小概率事件, 在一个很短的时间内发生 2 个或 2 个以上故障的可能性极小, 可不予考虑, 因此在推导出某个底事件成立后即可结束诊断, 将该底事件作为故障原因存入故障表中, 并输出诊断结论。

### 5 网络化故障诊断系统的设计与实现

本文将动态故障树分析法应用到飞机 CSCF-AC 电源系统的故障诊断中, 建立一个 3 层结构的飞机电源网络化故障诊断系统, 系统结构如图 2 所示。

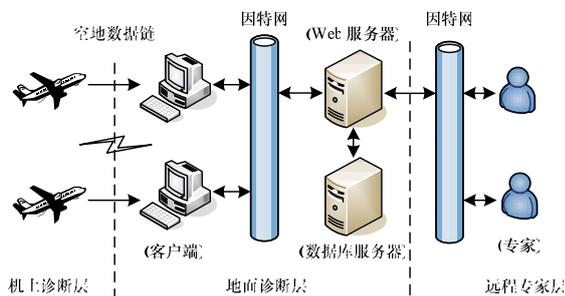


图 2 本文系统结构

该网络系统第 1 层为机上诊断层, 利用机内自检系统完成对飞机电源系统故障的初步检测, 并将信息通过空地数据链传输至第 2 层地面诊断层。

地面诊断层由分布各地的地面维修中心(客户端)与远程诊断中心(Web 服务器和数据库服务器)组成, 利用故障树推理算法对数据进行诊断, 并给出故障的具体原因和部位。

该网络系统第 3 层为远程专家层, 由分布在各航空公司、飞机制造商及科研院所的专家组成, 为故障诊断提供了一个强大的技术支持平台, 使得远程专家不用亲临现场也能够参

与到诊断中去。

该系统以 J2EE 为开发平台, 采用 Java 语言开发, 数据库为 MySQL 数据库, 网络结构采用浏览器/服务器(B/S)结构, 即所有的诊断、管理软件都放在 Web 服务器上, 数据则存放在数据库服务器, 用户通过浏览器与诊断系统进行交互。

系统在局域网内进行了实验验证, 用 3 台计算机分别作为客户端、远程诊断中心和远程专家端。客户端通过浏览器访问系统主页, 进入故障在线诊断页面并输入相应故障数据, 如图 3 所示(限于篇幅, 只截取部分数据)。之后将数据和诊断请求发送至 Web 服务器, Web 服务器则根据接收到的数据和请求调用相应诊断程序和数据库服务器, 并将诊断结果返回至客户端, 生成新的 Web 页面显示给用户, 如图 4 所示。

特征参数			
电流(A相)(A):	140.3	电流(B相)(A):	141.75
电压(A相)(V):	85.3	电压(B相)(V):	85.7
频率(Hz):	208	电压调节(V):	0.8
滑油压力(PSI):	59	滑油温度(°C):	101
发动机转速:	0.41	(该值为与发动机额定转速之比)	

图 3 输入的故障数据界面图

故障原因	诊断依据	维修建议
欠速保护开关故障	1. 发动机转速低于额定转速下限, 但CSD未脱开; 2. 存在欠速现象。	检查并更换欠速保护开关

图 4 返回的诊断结论界面图

由于飞机电源系统是一个极其复杂且与飞机其他系统密切相关的系统, 任何自动诊断软件都不可能绝对准确地诊断出所有故障, 因此对于在第 2 层难以识别的故障, 客户端用户可以通过远程协助功能, 将故障的详细信息, 例如文字描述、图片、视频等, 通过文字和附件的形式上传至服务器, 如图 5 所示。专家则通过该系统下载相关故障信息, 利用自己的专业知识或工具对其进行诊断, 并提出诊断意见, 如图 6 所示。

电源系统类型:

发电机功率(GVA):

上传附件:

故障描述:

同时存在欠频和欠压现象, 但发动机转速表指示发动机转速正常, 经检查CSD调节器和欠速保护开关均正常。

图 5 故障描述界面图

故障原因:

确认方法:

存在欠压和欠频现象说明由发动机带动的发电机转速过低, 但是发动机转速指示表显示发动机未欠速, 有可能是有CSD故障或欠速保护开关故障引起, 但检查发现欠速保护开关正常, 说明发动机说明是发动机转速传感器或转速指示出问题, 导致不能正常检测发动机转

维修建议:

检查并更换发动机转速传感器。

图 6 专家意见界面图