

航空发动机滑油系统动态故障分析

孙杨慧^{1,2}, 杨坤^{1,2}, 侯乃先^{1,2}, 余云峰^{1,2}

1. 中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108
2. 上海商用飞机发动机工程技术研究中心, 上海 201108

摘要 为解决航空发动机滑油系统安全性分析中容错与冗余备份系统的故障建模与分析, 提出了基于动态逻辑门和模块化思想的动态故障树分析方法。针对滑油系统某典型的故障状态, 开展动态故障树建模, 与传统的静态故障树建模方法进行比较。分析结果表明, 使用静态故障树建模得到的滑油系统故障发生频率远远偏离系统真实的故障发生频次(误差将近20倍); 动态故障树建模可以准确描述系统故障的时序关系, 且在保证分析效率的前提下精确评估滑油系统的故障发生概率。动态故障树建模方法在航空发动机系统尤其是民用航空发动机系统安全性评估中具有非常广泛的应用前景。

关键词 发动机; 滑油系统; 安全性评估; 动态故障建模

中图分类号 TB114

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.011

Dynamic fault analysis of engine lubrication system

SUN Yanghui^{1,2}, YANG Kun^{1,2}, HOU Naixian^{1,2}, SHE Yunfeng^{1,2}

1. AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China
2. Shanghai Engineering Research Center of Civil Aero Engine, Shanghai 201108, China

Abstract In this paper, a dynamic fault tree model was first applied to evaluate safety of the engine lubrication system with fault-tolerance and redundancy configuration. Using the dynamic fault tree and classical fault tree methods, a typical failure condition of the lubrication system was modeled and analyzed. The results show that the classical fault tree model cannot quantify the dynamic behavior aspect of system safety in a reasonable fashion, and prediction of failure probability deviates far from the actual situation (analytical errors up to 20 times). Meanwhile, the dynamic fault tree model not only correctly describes the sequence-based failure conditions, but also efficiently yields better quantitative failure probability calculation, demonstrating that dynamic fault tree model will have high potential in safety analysis of engine systems.

Keywords engine; lubrication system; safety analysis; dynamic fault modeling

安全是民用航空发动机的根本,它在发动机的研制、生产及使用过程中的地位毋庸置疑。现代航空发动机系统是由机械、电子、电气、液压等部件高度集成的大型复杂系统,正是由于这种耦合性与集成性,使得系统中的细微差错或故障有可能酿成严重的事故,因此在发动机设计过程中,将采取一些安全装置,如报警系统、状态指示系统来确保在发动机出现严重故障之前提醒机组人员采取相应的措施降低风险。对于这类采用失效-安全设计决策的系统,故障模式已经不能单纯用底事件的组合来描述,必须要考虑底事件故障的先后顺序关系,而这种动态特性是传统的静态故障树模型所不能描述的。

马尔可夫模型(Markov model)虽然能够处理动态故障,但该方法通常是通过求解一系列的状态方程获得系统的故障概率,即便是对于一个简单的系统,马尔可夫模型的建立和求解也非常繁琐,有时甚至由于运算量大而无法求解^[1,2]。基于这种现状,研究一种先进的故障建模与故障分析方法,满足目前民用航空发动机安全性分析的发展趋势非常必要。

本文以某型航空发动机滑油系统典型故障状态作为顶层事件,提出一种面向容错以及动态重构系统的航空发动机安全性评估方法,分析结果表明,与传统的故障树建模方法相比,动态故障树方法不仅可以准确描述动态系统的故障状态,还能精确评估系统的故障发生概率,分析结果还可以为

收稿日期:2014-09-01;修回日期:2015-01-01

作者简介:孙杨慧,博士,研究方向为航空发动机系统安全性、可靠性,电子邮箱:sunyanghui2003@163.com

引用格式:孙杨慧,杨坤,侯乃先,等.航空发动机滑油系统动态故障分析[J].科技导报,2015,33(5):72-77.

系统架构优化及研制成本的合理分配提供有力支撑。

1 动态故障树分析方法的基本思路

动态故障树分析的主要核心内容包括动态故障树建模、模块化分解以及模块的合并。动态故障树建模^[3-6]与传统的故障树建模的区别在于动态故障树引入了动态逻辑门来表达系统的故障传递路径,例如优先与门、热/温/冷备份门等,这些动态逻辑门能够更准确描述系统失效的时序关系,优先与门表示系统失效取决于基本事件失效的先后顺序,而这种动态特征运用传统的静态故障树是无法表征的。动态故障树的模块化分解是指将动态故障树分解成一系列简单的静态子树与动态子树,达到简化故障树、提高分析效率的目的,一般是将仅含有静态逻辑门的子树归为静态子树;将仅含有动态逻辑门的子树归为动态子树。模块的合并思想是将最底层的静态子树或动态子树对应的顶层事件发生概率作为上一层逻辑门输入事件的故障概率,至下而上,层层类推,最终得到系统最顶层事件的故障概率,这种利用模块合并的方法求解顶层事件发生概率不仅可以提高分析效率,还可以降低计算出错的概率。

2 滑油系统的功能

滑油系统作为发动机的重要组成部分,其功能主要包括:向发动机主轴轴承、附件齿轮箱、传动齿轮箱、封严等提供滑油和冷却;为发动机燃油系统提供加温介质,提高燃油温度。滑油系统对发动机的安全运行起着非常关键的作用,滑油系统不工作会导致发动机轴承系统以及传动系统严重磨损,不仅降低部件的使用寿命,还可能引起发动机的连环失效,导致发动机振动过大甚至出现非包容转子爆破等极其恶劣的发动机后果。为提高滑油系统的安全性,在滑油系统的设计中一般都添加滑油状态的监视及报警装置。

滑油系统中的滑油温度、压力传感器,油滤压差传感器以及屑末探测器可以实时地采集滑油温度、压力、油滤状态以及滑油中的磁性屑末信号,并通过EEC将相关信号传送到飞机驾驶舱内的中央显示系统。当滑油压力低于限制值或当主回油滤进口与出口压差超过限制值时机舱内的显示系统会给出警示信息,提醒机组人员采取相应的措施,降低由此可能导致的危险。滑油状态信号的采集、传递及显示的功能如图1所示。

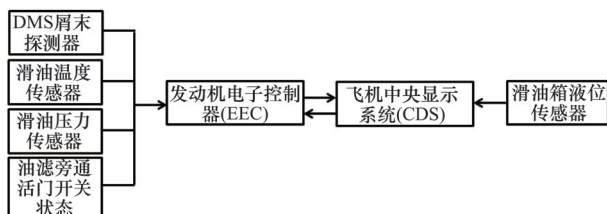


图1 某型发动机滑油指示系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of an oil indicating system

对滑油系统而言,可能导致发动机磨损的原因主要包括:

- 1) 滑油压力低导致轴承与齿轮箱等润滑部件润滑不彻底;
- 2) 滑油滤堵塞,导致未经过滤的滑油直接进入轴承及传动系统,滑油中可能存在的铁屑与机械部件摩擦,引起发动机磨损。

当滑油指示与警告系统处于完好状态时,以上故障并不会导致非常恶劣的发动机后果,只有当滑油指示及报警系统先发生故障,导致机组员无法及时的采取相应的缓解或纠正措施,“滑油系统故障引起的发动机严重磨损”才能成立。

3 构建故障树

基于以上对“滑油系统故障导致发动机严重磨损”的故障原因分析,构建故障树,并引入优先与门与热备份门来描述系统故障的时序关系,其中传感器或EEC故障均会导致滑油状态无指示或错误指示,而滑油压力过低可能由滑油泵故障、滑油管路漏油及滑油箱内滑油不足导致,滑油污染的原因主要包括油滤破损及油滤堵塞。

3.1 故障树模块化分解,构建静、动态子树的概率求解模型

图2为故障逻辑传递关系,将图中的动态故障树进行模块化分解,将故障树分解成静态子树与动态子树。本文遵循的基本原则:将包含静态逻辑门的子树归为静态子树;将包含动态逻辑门的子树归为动态子树。基于该原则可获得静态子树包括G1、G4、G5、G6、G7、G8、G9、G10,动态子树包括G2、G3、G11。对于静态子树,本文采用二元决策图(BDD)^[7,8]方法进行求解。该方法用“图”的形式定义一种“数学函数”,如图3所示。在BDD图中,节点表示故障树的底事件,由根节点到叶节点的路径代表了底层事件发生或不发生的不变化组合,“0”表示完好状态,“1”表示故障状态,若一条路径的叶节点(终点)为1,表示该路径导致顶层事件发生;若一条路径的叶节点(终点)为0,则表示该路径不会导致顶层事件发生。将静态子树转化为BDD图后,便可以非常直观获得该子树对应的所有故障模式和传播路径。

对于动态子树的概率计算,需要构建马尔科夫故障模型,而后从模型中提取出导致顶层事件发生的故障传递路径,其中故障模型的建立需要将逻辑门的动态特征用状态转移图描述,图4(a)、(b)、(c)分别为动态逻辑门G2、G3、G11对应的状态转移图,弧线上的数值代表状态转移率。图中用 λ_{G4} 、 λ_{G5} 表示G4、G5的故障率; λ_{G6} 、 λ_{G7} 表示G6、G7的故障率。图4(c)为热备份门“EEC丧失电源”的状态转移,图中描述了EEC供电系统由完好状态到故障状态的所有故障模式与传递路径,由于EEC的电源切换功能是通过电子切换开关实现的,当其中的某个电源发生故障时,电子切换系统会将热备份切换到工作模式为EEC供电,因此在状态转移图中必须考虑电子切换开关对EEC供电系统的影响。图中 λ_{E6} 、 λ_{E7} 、 λ_{sw} 分别表示EEC专用电源、飞机电源以及电源切换开关的故障率。有关马尔科夫的建模步骤可以查阅文献[9]和[10]。

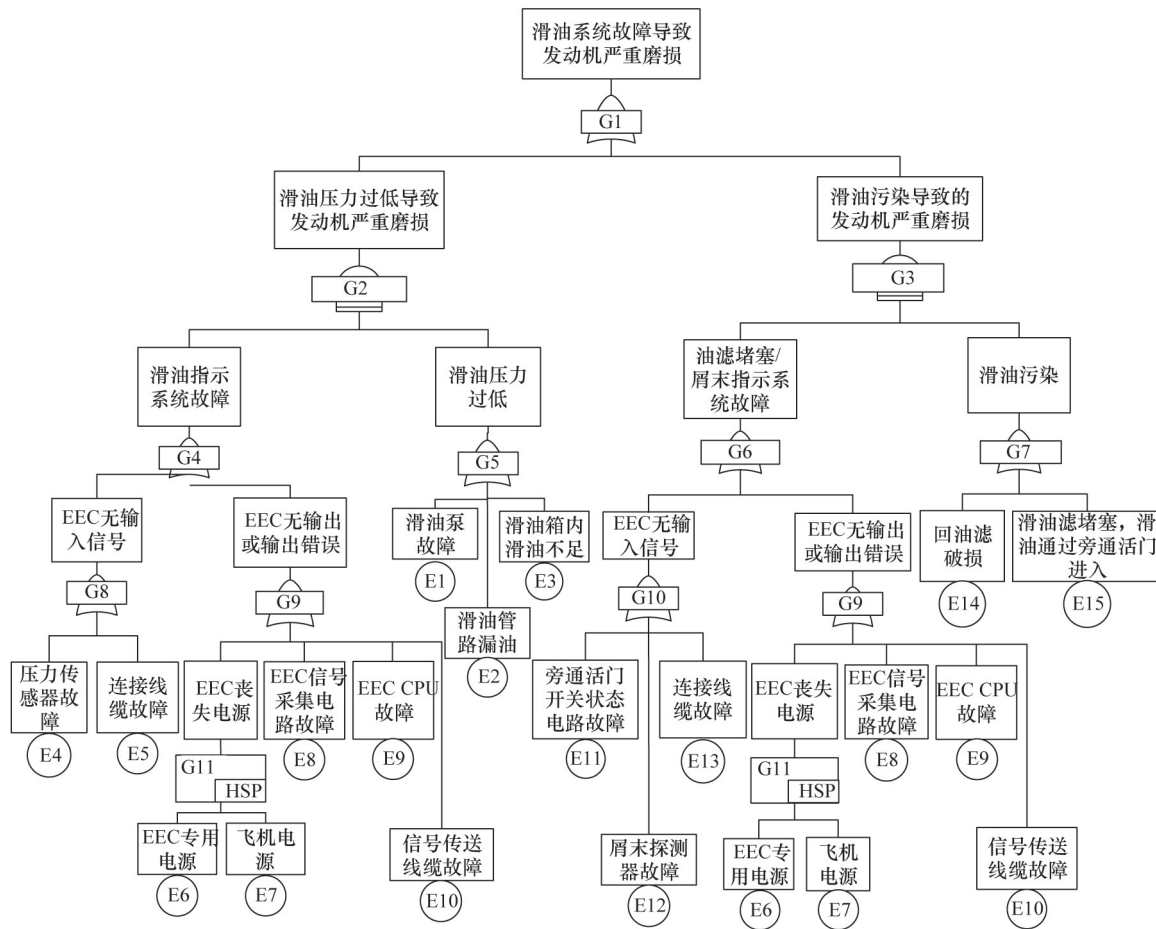


图2 故障树分析模型

Fig. 2 Fault tree model

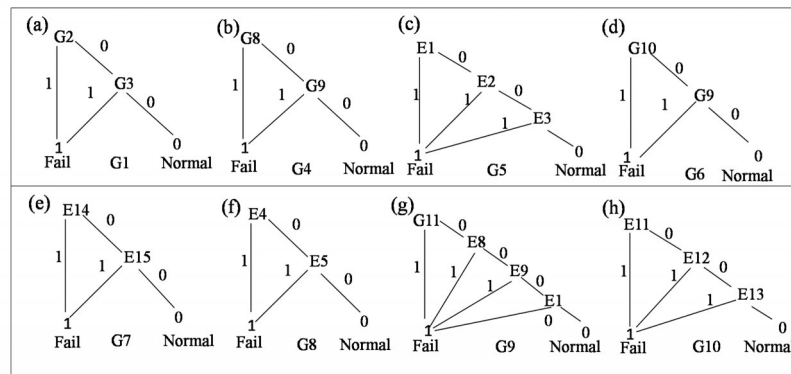


图3 静态子树的BDD图

Fig. 3 BDD figure of static fault tree

3.2 求解静态子树最小割集、动态子树的最小顺序割集

图3给出了静态子树对应的BDD图,为获得最小割集,需要对从根结点到叶结点为1的路径进行搜索,在搜索过程中,只关注结点的1分支(表示底事件故障),由这些结点的1分支组成的集合就是系统的割集,基于上述方法可以获得静态子树的最小割集(表1)。

对于动态子树G2(对应的顶事件:滑油压力过低导致的发动机严重磨损),通常情况下,只有当滑油压力指示系统先

发生故障(对应逻辑G4),G2对应的顶事件才成立。同样,对动态子树G3(对应的顶事件:滑油污染导致的发动机严重磨损),只有当油滤堵塞与屑末指示系统先发生故障(对应逻辑G6),导致机组人员无法获悉相关的故障信息,才可能造成发动机严重磨损。基于以上分析,可从状态转移图4(a)、(b)中提取出导致发动机严重磨损的马尔科夫状态转移链(图5)。由此可以得到G2对应的最小顺序割集:(G4→G5);G3对应的最小顺序割集:(G6→G7);箭头表示故障发生的顺序。

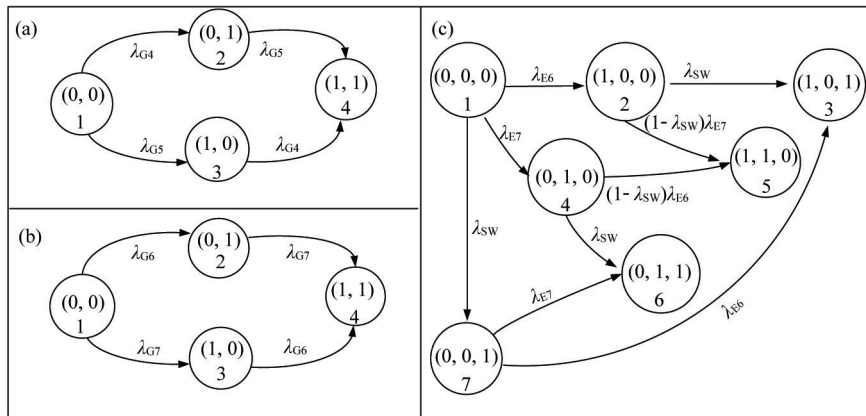


图4 动态逻辑门G2 (a)、G3 (b)和G11 (c)对应的马尔科夫状态转移
Fig. 4 Markov state-transition of G2 (a), G3 (b) and G11 (c)

表1 静态子树对应的最小割集

Table 1 Minimal cut sets of static subtree

静态子数	最小割集
G1	{G2}{G3}
G4	{G8}{G9}
G5	{E1}{E2}{E3}
G6	{G10}{G9}
G7	{E14}{E15}
G8	{E4}{E5}
G9	{G11}{E8}{E9}{E10}
G10	{E11}{E12}{E13}

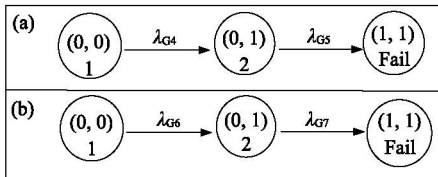


图5 动态逻辑门G2 (a)、G3 (b)对应的马尔科夫链
Fig. 5 Markov chain of G2 (a) and G3 (b) respectively

对于动态子树G11,对应的马尔科夫状态转移如图4(c)所示。EEC供电系统的3个组成部件中任意两个部件故障都会导致其丧失电源供应,因此图4(c)中(101)、(110)和(011)均表示“EEC丧失电源”的故障状态,对应的状态转移链见图6,其中每条马尔科夫链均都代表一个最小顺序割集。

3.3 求解故障发生概率

计算静态子树的故障发生概率,可利用最小割集法进行求解,以Q表示顶事件,假设最小割集为 K_1, K_2, \dots, K_N ,则顶事件发生概率为

$$P(Q) = P(K_1 \cup K_2 \cup \dots \cup K_N) = \sum_{i=1}^{N_1} P(K_i) - \sum_{i < j = 2}^{N_1} P(K_i K_j) + \sum_{i < j < k = 3}^{N_1} P(K_i K_j K_k) + \dots + (-1)^{N_1-1} P(K_1, K_2, \dots, K_{N_1}) \quad (1)$$

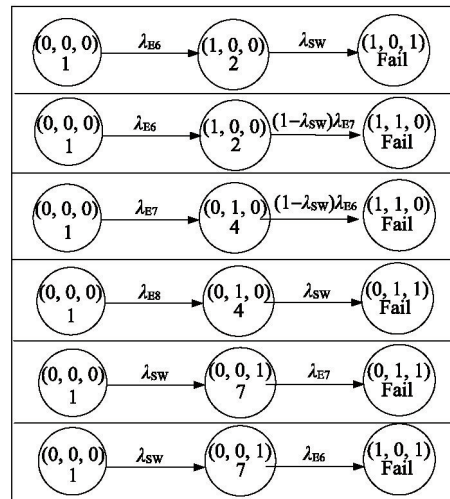


图6 动态子树G11对应的马尔科夫链
Fig. 6 Markov chain of G11

对于动态子树故障概率的计算,可以通过马尔科夫转移矩阵进行计算,但随着动态故障树规模的增大,马尔科夫状态转移图中状态数目呈指数增长,转移矩阵的维数也相应增加,以至求解耗时过长,失去了计算的意义。本文运用一种简便的状态转移链法求解动态子树的发生概率,其基本思路为将动态子树对应的状态转移图分解得到状态转移链,带入式(2)便可得到该条路径导致的故障发生概率,最后综合各条链的计算结果,便可得到该动态子树的故障发生概率^[11]。

$$P^{T_n}(t) = \prod_{i=1}^n \lambda_{i-1,i} \left[\prod_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i-1,i}} - \sum_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda_{i-1,i} t}}{\lambda_{i-1,i} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (-\lambda_{i-1,i} + \lambda_{j-1,j})} \right] \quad (2)$$

动态子树G2、G3及G11对应的状态转移链分别见图5(a)、(b)和图6。利用上述方法,得到动态子树G2的故障发生概率为

$$P_{G2}(t) = p^{T_2} = \lambda_{G4} \lambda_{G5} \left[\frac{1}{\lambda_{G4} \lambda_{G5}} - \frac{e^{-\lambda_{G4} t}}{\lambda_{G4} (-\lambda_{G4} + \lambda_{G5})} - \frac{e^{-\lambda_{G5} t}}{\lambda_{G5} (-\lambda_{G5} + \lambda_{G4})} \right] \quad (3)$$

动态子树 G3 的故障发生概率为

$$P_{G3}(t) = p^{T_2} = \lambda_{G6} \lambda_{G7} \left[\frac{1}{\lambda_{G6} \lambda_{G7}} - \frac{e^{-\lambda_{G6}t}}{\lambda_{G6}(-\lambda_{G6} + \lambda_{G7})} - \frac{e^{-\lambda_{G7}t}}{\lambda_{G7}(-\lambda_{G7} + \lambda_{G6})} \right] \quad (4)$$

动态子树 G11 的故障发生概率为

$$P_{G11}(t) = p_1^{T_2} + p_2^{T_2} + p_3^{T_2} + p_4^{T_2} + p_5^{T_2} + p_6^{T_2} \quad (5)$$

$$p_1^{T_2} = \lambda_{E6} \lambda_{SW} \left[\frac{1}{\lambda_{E6} \lambda_{SW}} - \frac{e^{-\lambda_{E6}t}}{\lambda_{E6}(-\lambda_{E6} + \lambda_{SW})} - \frac{e^{-\lambda_{SW}t}}{\lambda_{SW}(-\lambda_{SW} + \lambda_{E6})} \right] \quad (6)$$

$$p_2^{T_2} = \lambda_{E6}(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E7} \left[\frac{1}{\lambda_{E6}(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E7}} - \frac{e^{-(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E7} t}}{(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E7} (- (1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E7} + \lambda_{E6})} - \frac{e^{-\lambda_{E6}t}}{\lambda_{E6}(-\lambda_{E6} + (1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E7})} \right] \quad (7)$$

$$p_3^{T_2} = \lambda_{E7}(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E6} \left[\frac{1}{\lambda_{E7}(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E6}} - \frac{e^{-(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E6} t}}{(1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E6} (- (1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E6} + \lambda_{E7})} - \frac{e^{-\lambda_{E7}t}}{\lambda_{E7}(-\lambda_{E7} + (1 - \lambda_{SW}) \lambda_{E6})} \right] \quad (8)$$

$$p_4^{T_2} = \lambda_{E7} \lambda_{SW} \left[\frac{1}{\lambda_{E7} \lambda_{SW}} - \frac{e^{-\lambda_{E7}t}}{\lambda_{E7}(-\lambda_{E7} + \lambda_{SW})} - \frac{e^{-\lambda_{SW}t}}{\lambda_{SW}(-\lambda_{SW} + \lambda_{E7})} \right] \quad (9)$$

$$p_5^{T_2} = \lambda_{SW} \lambda_{E7} \left[\frac{1}{\lambda_{SW} \lambda_{E7}} - \frac{e^{-\lambda_{SW}t}}{\lambda_{SW}(-\lambda_{SW} + \lambda_{E7})} - \frac{e^{-\lambda_{E7}t}}{\lambda_{E7}(-\lambda_{E7} + \lambda_{SW})} \right] \quad (10)$$

$$p_6^{T_2} = \lambda_{SW} \lambda_{E6} \left[\frac{1}{\lambda_{SW} \lambda_{E6}} - \frac{e^{-\lambda_{SW}t}}{\lambda_{SW}(-\lambda_{SW} + \lambda_{E6})} - \frac{e^{-\lambda_{E6}t}}{\lambda_{E6}(-\lambda_{E6} + \lambda_{SW})} \right] \quad (11)$$

假设所有静态子树及动态子树所涉及的底事件故障率如表2所示,其中暴露时间为一次航段的飞行时间,本文约定为3h。

表2 静态子树底事件故障率

Table 2 Failure rate of basic events of static subtrees

基本事件名称	故障率	暴露时间/h
E1: 滑油泵	1.0×10^{-4}	3
E2: 滑油管路	1.0×10^{-5}	3
E3: 滑油液位传感器	1.0×10^{-4}	3
E4: 压力传感器	7.0×10^{-5}	3
E5: 连接线缆	1.0×10^{-6}	3
E6: EEC 专用电源(PMA)	1.5×10^{-5}	3
E7: 飞机电源	3.9×10^{-5}	3
E8: 信号采集电路	1.0×10^{-5}	3
E9: EEC CPU	1.7×10^{-4}	3
E10: 信号传送线缆	1.0×10^{-6}	3
E11: 旁通活门开关状态电路	1.0×10^{-5}	3
E12: 屑末探测器	1.0×10^{-4}	3
E13: 连接线缆	1.0×10^{-6}	3
E14: 回油滤破损	1.0×10^{-4}	3
E15: 滑油滤堵塞	1.0×10^{-4}	3
SW: 电源切换开关	1.2×10^{-5}	3

基于以上给出的基本事件的失效率数据,将其带入到相应的概率计算公式中便可以得到不同逻辑门对应的故障发生概率,计算结果见表3。

表3 各逻辑门对应的故障发生概率

Table 3 Failure probability corresponding to each logic gates

逻辑门名称	故障发生概率
G1	5.14×10^{-7}
G2	2.45×10^{-7}
G3	2.69×10^{-7}
G4	7.77×10^{-4}
G5	6.30×10^{-4}
G6	8.97×10^{-4}
G7	6.00×10^{-4}
G8	2.13×10^{-4}
G9	5.64×10^{-4}
G10	3.33×10^{-4}
G11	1.11×10^{-8}

为说明动态故障树的优势,本文也采用传统的故障树建模方法展开分析,即将优先与门G2、G3用传统的与门替换(不考虑故障发生的先后顺序),将热备份逻辑门G11也用与门替换(不考虑电源间的切换开关),量化顶事件的发生概率,并将计算结果与动态故障树建模的结果进行了对比,见表4(注:动态故障树建模的计算结果来自于表3)。从表4中不难看出,对于动态重构系统与容错系统的故障分析,利用传统故障树建模的方法计算故障发生概率存在较大的偏差,以G1、G2逻辑门为例,静态故障树分析的结果是系统实际发生故障频次的2倍;对于EEC供电系统(对应逻辑门G11),由于在静态故障树分析模型中未考虑电源切换开关对备份系统正常工作的影响,因此预计的故障发生频率远远偏离系统

表4 传统故障树分析结果与动态故障树分析结果

Table 4 Analysis results based on classical fault tree and dynamic fault tree models

逻辑门	发生概率	
	传统故障树建模	动态故障树建模
G1	10.27×10^{-7}	5.14×10^{-7}
G3	5.38×10^{-7}	2.39×10^{-7}
G11	5.58×10^{-10}	1.11×10^{-8}

真实的故障发生频次(误差高达近20倍)。错误的安全性评估结果,不仅无法指导设计的优化,还可能造成不必要的研制成本浪费,因此选择正确的安全性分析模型对于民机发动机而言尤为重要。

4 结论

提出了一种面向动态重构与容错系统的故障评估方法,与传统的故障树分析方法相比,动态故障树不仅可以准确描述系统故障的时序性特征,还可以极大降低马尔科夫建模分析的复杂性,提高分析效率。对滑油系统的典型故障状态的分析结果表明:

1) 运用传统故障树建模无法表征系统故障的时序特征,同时基于该模型计算得到的滑油系统的故障发生频次以及EEC电源的故障概率值存在非常大的误差,无法为系统的架构优化与资源的合理配置的提供可靠的依据。

2) 与传统的故障树分析方法相比动态故障树建模不仅可以准确的表达滑油系统故障的时序性关系,还可以准确量化系统故障发生概率,在满足最低安全性要求的前提下,能够为系统的设计优化提供依据,避免不必要的研制成本浪费。

参考文献(References)

- [1] 赵廷弟. 安全性设计分析与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 158-159.
Zhao Tingdi. Safety design analysis and verification[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 158-159.
- [2] 罗云林, 张巨联, 杨剑忠. 基于马尔科夫方法的飞控系统安全性评估[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(4): 16-19.
Luo Yunlin, Zhang Julian, Yang Jianzhong. Safety assessment research of flight control system based on MA model[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(4): 16-19.
- [3] 张晓洁, 赵海涛, 苗强, 等. 基于动态故障树的卫星系统可靠性分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1249-1255.
Zhang Xiaojie, Zhao Haitao, Miao Qiang, et al. Reliability analysis of satellite system based on dynamic fault tree[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3): 1249-1255.
- [4] 王新阁, 张显余, 张艳敬, 等. 某型运输机飞控计算机动态故障树分析[J]. 飞机设计, 2011, 31(4): 69-73.
Wang Xinge, Zhang Xianyu, Zhang Yanjing, et al. Dynamic fault tree analysis of flight control computer for some type transporter[J]. Aircraft Design, 2011, 31(4): 69-73.
- [5] Manian R, Coppit D W, Sullivan K J, et al. Bridging the gap between systems and dynamic fault tree models[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Washington: IEEE, 1999, 105-111.
- [6] Long W, Sato Y, Horigome M. Quantification of sequential failure logic of fault tree analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000, 67: 269-274.
- [7] 徐亨成, 张建国. 基于BDD技术下的故障树重要度分析[J]. 电子机械工程, 2003, 19(6): 1-4.
Xu Hengcheng, Zhang Jianguo. The importance analysis of fault tree based-on the binary decision diagrams (BDD) technique[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2003, 19(6): 1-4.
- [8] Zhang X Y, Sun H R. A BDD based algorithm for reliability analysis of phased mission systems[J]. IEEE Trans on Reliability, 1999, 46 (1): 50-60.
- [9] 张文韬, 张友鹏, 苏宏升, 等. 基于动态故障树的CTCS-3级ATP系统可靠性分析[J]. 工程设计学报, 2014, 21(1): 18-25.
Zhang Wentao, Zhang Youpeng, Su Hongsheng, et al. Reliability analysis on ATP system of CTCS-3 based on dynamic fault tree[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2014, 21(1): 18-25.
- [10] 王栋. 基于动态故障树分析的民用飞机辅助动力装置系统安全性评估[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(3): 48-52.
Wang Dong. Safety assessment of auxiliary power unit (APU) system for civil aircraft based on dynamic fault tree analysis (DFTA) [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014(3): 48-52.
- [11] 朱正付, 李长福, 何恩山, 等. 基于马尔科夫链的动态故障树分析方法[J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1104-1107.
Zhu Zhengfu, Li Changfu, He Enshan, et al. The dynamic fault tree analysis method based on Markov chain[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(9): 1104-1107.

(责任编辑 赵业玲)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。