

基于 Vague 故障树的航空电子系统可靠性分析

张 超^{1,2}, 马存宝^{1,2}, 宋 东¹, 许家栋²

(1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

摘 要: 由于航空电子系统工作时存在失常态, 且其失效行为具有不确定性, 因此基于概率论的故障树分析(FTA)模型不适用于分析其可靠性。该文引入 Vague 集描述底事件的失效行为, 并构造了基于三角形 Vague 集算术运算的与/或门模糊算子, 提出一种 Vague 故障树分析(VFTA)模型。对某直流系统进行可靠性分析表明, VFTA 模型比其它模糊 FTA 模型更灵活、更有效。

关键词: 航空电子系统; 失常态; 三角形 Vague 集; Vague 故障树

Reliability Analysis of Avionic System Based on Vague Fault Tree

ZHANG Chao^{1,2}, MA Cun-bao^{1,2}, SONG Dong¹, XU Jia-dong²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. School of Electrical and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

【Abstract】 Because most avionic equipments have abnormal states and its failure behaviors are always characterized in uncertainty, it is very difficult to analyze its reliability by Fault Tree Analysis(FTA) model which is based on probability theory. To solve this problem, the failure behaviors of bottom events are represented by triangle Vague sets, and the AND/OR fuzzy operators are built based on arithmetic operations of triangle Vague sets, and sequentially the Vague Fault Tree Analysis(VFTA) model is proposed. Three FTA models are adopted respectively to analyze the reliability of a DC system, and the comparisons show that the proposed VFTA model is more flexible and more effective than the other fuzzy FTA models.

【Key words】 avionic system; abnormal state; triangle Vague sets; Vague fault tree

1 概述

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)是进行系统可靠性和安全性分析的重要手段, 已广泛应用于当代航空、航天、电子和其他高技术领域中^[1]。航空电子系统的结构越来越复杂、功能越来越强大, 并有如下特点: (1)由于受环境应力、随机干扰和时间应力等因素的影响, 使得系统工作时除了正常和失效两种状态, 还会出现大量的“失常态”, 如间歇态、瞬态效应等; (2)由于其故障原因错综复杂, 因此各部件的故障概率很难精确量化, 且经常出现可靠性数据严重短缺问题^[2]; (3)各部件的失效行为常含有大量随机性、模糊性和不确定性因素^[3]。因此, 基于概率论的FTA模型无法对系统进行有效分析。文献[2-3]提出的模糊FTA模型用模糊数代替精确概率, 虽较好地解决了传统FTA模型的概率假设问题, 但没有解决二态假设问题。而Pawlak教授提出的Vague集通过其隶属函数表示对一个对象的支持度、反对度和未知度3种信息, 为不确定性数据的表达和分析提供了有效手段, 目前已在海外被成功地应用于决策分析及故障诊断等领域^[4-5], 取得了较好的效果。本文将Vague集理论引入到复杂航空电子系统可靠性分析中, 用定义在[0,1]上的三角形Vague集来刻画底事件的正常态、失效态和失常态行为, 从而建立了一种Vague故障树分析(Vague Fault Tree Analysis, VFTA)模型。

2 Vague 集理论

定义 1^[4] 设论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, X 上 Vague 集 A 由真隶属函数 t_A 和假隶属函数 f_A 来描述:

$$t_A: X \rightarrow [0,1]$$

$$f_A: X \rightarrow [0,1]$$

其中, $t_A(x_i)$ 是由支持 x_i 的证据所导出的肯定隶属度的下界; $f_A(x_i)$ 是由反对 x_i 的证据所导出的否定隶属度的下界; $t_A(x_i) + f_A(x_i) \leq 1$ 。元素 x_i 在 Vague 集 A 中的隶属度被区间 $[0,1]$ 上的子区间 $[t_A(x_i), 1 - f_A(x_i)]$ 所界定, 称该区间为 x_i 在 A 中的 Vague 值, 记为 $v_A(x_i)$ 。

对 $\forall x \in X$, 称 $\pi_A(x) = 1 - t_A(x) - f_A(x)$ 为 x 相对于 Vague 集 A 的 Vague 度, 它刻画了 x 相对于 Vague 集 A 的踌躇程度, 是 x 相对于 A 的未知信息的一种度量。

设 A 和 B 为如图 1 所示的 2 个三角形 Vague 集, 其数学表达式分别为式(1)和式(2)。

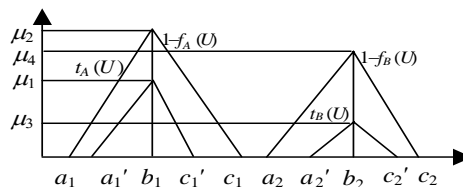


图 1 三角形 Vague 集 A 和 B

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572173); 航天创新基金资助项目(2004CH01001); 西北工业大学青年科技创新基金资助项目(M016217)

作者简介: 张 超(1977 -), 男, 讲师, 主研方向: 航空电子系统; 马存宝、宋 东, 副教授; 许家栋, 教授

收稿日期: 2007-06-13 **E-mail:** zc85377@126.com

若 $t_A \neq t_B$ 且 $1-f_A \neq 1-f_B$, 则三角形 Vague 集 A 和 B 的算术运算法则如下:

$$A = \langle [(a'_1, b_1, c'_1); \mu_1], [(a_1, b_1, c_1); \mu_2] \rangle \quad (1)$$

$$B = \langle [(a'_2, b_2, c'_2); \mu_3], [(a_2, b_2, c_2); \mu_4] \rangle \quad (2)$$

$$A(+)B = \langle [(a'_1 + a'_2, b_1 + b_2, c'_1 + c'_2); \min(\mu_1, \mu_2)], [(a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2); \min(\mu_3, \mu_4)] \rangle \quad (3)$$

$$A(-)B = \langle [(a'_1 - c'_2, b_1 - b_2, c'_1 - a'_2); \min(\mu_1, \mu_2)], [(a_1 - c_2, b_1 - b_2, c_1 - a_2); \min(\mu_3, \mu_4)] \rangle \quad (4)$$

$$A(\times)B = \langle [(a'_1 a'_2, b_1 b_2, c'_1 c'_2); \min(\mu_1, \mu_2)], [(a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2); \min(\mu_3, \mu_4)] \rangle \quad (5)$$

3 VF TA 模型

借鉴传统 FTA 模型, VF TA 的基本分析步骤如下:

(1)选择顶事件, 使用各种逻辑门构造故障树, 并对其进行正规化处理。

(2)通过可靠性手册、经验数据等获得各底事件的三角形 Vague 集可靠性数据。

(3)利用上行法或下行法^[1]定性求解出故障树的最小割集(Minimal Cut Set, MCS)或最小路集(Minimal Path Set, MPS)。

(4)利用与/或门模糊算子并结合模糊结构函数, 定量计算出顶事件的发生概率及各底事件的重要度。

(5)分析结果, 提出改进意见。

下面对 VF TA 模型中的与/或门模糊算子和模糊重要度进行详述。

在传统 FTA 模型中, 与/或门算子分别为

$$q_{AND} = \prod_{i=1}^n q_{ANDi} \quad (6)$$

$$q_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - q_{ORi}) \quad (7)$$

其中, q_{ANDi} 为该与门所含事件 i 发生的精确概率; q_{ORi} 为该或门所含事件 i 发生的精确概率; n 为该与/或门所含事件的个数。类似地, 在 VF TA 模型中, 事件 i 的发生概率用三角形 Vague 集来表示, 则与/或门模糊算子如式(8)和式(9)所示。根据式(8)和式(9), 并结合模糊结构函数可计算出顶事件的发生概率, 即系统的模糊不可靠度。

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{AND} = & \langle [(a'_{AND}, b_{AND}, c'_{AND}); \mu^1_{AND}], [(a_{AND}, b_{AND}, c_{AND}); \mu^2_{AND}] \rangle = \\ & \prod_{i=1}^n \tilde{q}_i = \tilde{q}_1(\times) \tilde{q}_2(\times) \cdots (\times) \tilde{q}_n = \\ & \langle [(\prod_{i=1}^n a'_{ANDi}, \prod_{i=1}^n b_{ANDi}, \prod_{i=1}^n c'_{ANDi}); \\ & \min(\mu^1_{AND1}, \mu^1_{AND2}, \dots, \mu^1_{ANDn})], \\ & [(\prod_{i=1}^n a_{ANDi}, \prod_{i=1}^n b_{ANDi}, \prod_{i=1}^n c_{ANDi}); \\ & \min(\mu^2_{AND1}, \mu^2_{AND2}, \dots, \mu^2_{ANDn})] \rangle \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{OR} = & \langle [(a'_{OR}, b_{OR}, c'_{OR}); \mu^1_{OR}], [(a_{OR}, b_{OR}, c_{OR}); \mu^2_{OR}] \rangle = \\ & 1(-) \prod_{i=1}^m (1 - \tilde{q}_i) = 1 - (1 - \tilde{q}_1)(\times) (1 - \tilde{q}_2)(\times) \cdots (\times) (1 - \tilde{q}_m) = \\ & 1(-) \langle [(\prod_{i=1}^m (1 - c'_{ORi}), \prod_{i=1}^m (1 - b_{ORi}), \prod_{i=1}^m (1 - a'_{ORi})); \\ & \min(\mu^1_{OR1}, \mu^1_{OR2}, \dots, \mu^1_{ORm})], \\ & [(\prod_{i=1}^m (1 - c_{ORi}), \prod_{i=1}^m (1 - b_{ORi}), \prod_{i=1}^m (1 - a_{ORi})); \\ & \min(\mu^2_{OR1}, \mu^2_{OR2}, \dots, \mu^2_{ORm})] \rangle \quad (9) \end{aligned}$$

定义 2^[5] 设 \tilde{F}_{Top} 为 Vague 故障树顶事件的模糊发生概率; \tilde{F}_i 为 Vague 故障树中删除底事件 i 后计算得到的顶事件的模糊发生概率, 则底事件 X_i 的模糊重要度 FI_i 定义为

$$FI_i = (a'_{Top} - a'_i) + (a_{Top} - a_i) + (b_{Top} - b_i) + (c_{Top} - c_i) + (c'_{Top} - c_i) \quad (10)$$

其中, $\tilde{F}_i = \langle [(a'_i, b_i, c'_i); \mu^1_i], [(a_i, b_i, c_i); \mu^2_i] \rangle$; $\tilde{F}_{Top} = \langle [(a'_{Top}, b_{Top}, c'_{Top}); \mu^1_{Top}], [(a_{Top}, b_{Top}, c_{Top}); \mu^2_{Top}] \rangle$ 。

若 $FI_i > FI_j$, 则说明底事件 X_i 对顶事件的影响大于底事件 X_j 对顶事件的影响。因此, 要提高系统的可靠性, 首先应考虑改进底事件 X_i 。

4 实例分析

下面以某机载航空电子设备的直流子系统为例来说明 VF TA 模型的分析过程。该直流子系统结构复杂, 大量采用分离式元器件和触点开关, 图 2 为其故障树, 各事件的描述如表 1 和表 2 所示。

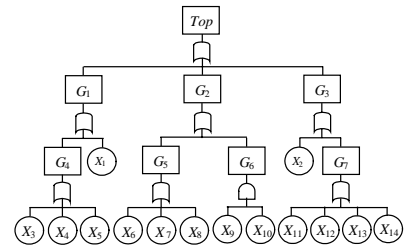


图 2 某航电设备直流电源子系统故障树

表 1 中间事件描述

序号	类型	故障名称	序号	类型	故障名称
Top	顶事件	直流电源子系统故障	G ₄	中间事件	发电机故障 1
G ₁	中间事件	电压不稳	G ₅	中间事件	调压器故障 1
G ₂	中间事件	电压小于 24 V 不充电	G ₆	中间事件	发电机故障 2
G ₃	中间事件	电压大于 30 V 不可控	G ₇	中间事件	调压器故障 2

表 2 底事件描述及其可靠性数据

序号	故障名称	a_i	a'_i	b_i	c'_i	c_i	μ_1	μ_2
X ₁	调节器内部脱焊	0.009 5	0.010 7	0.013 4	0.015 4	0.016 8	0.80	0.85
X ₂	激磁线圈正极短路	0.004 7	0.005 4	0.006 7	0.007 7	0.008 4	0.75	0.90
X ₃	硅二极管管脚松动	0.029 1	0.033 3	0.041 6	0.047 8	0.052 0	0.80	0.90
X ₄	磁刷接触不良	0.032 9	0.037 6	0.047 0	0.054 1	0.058 8	0.65	0.85
X ₅	电源开关接触不良	0.018 8	0.021 4	0.026 8	0.030 8	0.033 5	0.90	1.00
X ₆	硅二极管管脚断	0.042 3	0.048 3	0.060 4	0.069 5	0.075 5	0.85	0.95
X ₇	磁刷断或压力不够	0.023 5	0.026 9	0.033 6	0.038 6	0.042 0	0.80	1.00
X ₈	激磁线圈断开	0.018 8	0.021 4	0.026 8	0.030 8	0.033 5	0.65	0.85
X ₉	T和W ₁ 烧结	0.028 2	0.032 2	0.040 3	0.046 4	0.050 4	0.75	0.90
X ₁₀	调节电压过低	0.003 5	0.004 0	0.005 0	0.005 8	0.006 3	0.60	0.70
X ₁₁	可控硅二极管击穿	0.002 2	0.002 6	0.003 2	0.003 7	0.004 0	0.90	1.00
X ₁₂	T和W ₁ 断开	0.005 5	0.006 2	0.007 8	0.009 0	0.009 8	0.65	0.80
X ₁₃	W ₂ 损坏	0.002 0	0.002 2	0.002 8	0.003 2	0.003 5	0.70	0.85
X ₁₄	调节电压过高	0.007 3	0.008 3	0.010 4	0.012 0	0.013 0	0.80	0.90

运用上行法求得 MCS 共 13 个, 其中, 一阶 MCS 有 12 个, 分别是 {X₁}, {X₂}, {X₃}, {X₄}, {X₅}, {X₆}, {X₇}, {X₈}, {X₁₁}, {X₁₂}, {X₁₃}, {X₁₄}; 二阶 MCS 为 {X₉, X₁₀}; 没有三阶或更高阶的 MCS。假定各底事件相互独立, 则顶事件可表示为

$$Top = X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup X_4 \cup X_5 \cup X_6 \cup X_7 \cup X_8 \cup (X_9 \cap X_{10}) \cup X_{11} \cup X_{12} \cup X_{13} \cup X_{14} \quad (11)$$

当底事件 X_i 的可靠性测度用表 2 中的三角形 Vague 集 \tilde{q}_i 表示时, 则计算出的顶事件发生概率为

$$\tilde{F}_{Top} = \langle [(0.20387, 0.24885, 0.28113), 0.60]; [(0.18053, 0.24885, 0.30199), 0.70] \rangle$$

由式(10)可计算得到各底事件的重要度, 其结果见表 3。

可看出：底事件 X_6 对顶事件的影响最大，其次是 X_4 ，而 X_{13} 对顶事件的影响最小。

表 3 各底事件的模糊重要度

序号	重要度	排序	序号	重要度	排序	序号	重要度	排序
X_1	0.049 7	8	X_6	0.235 6	1	X_{11}	0.011 8	13
X_2	0.024 7	11	X_7	0.127 3	4	X_{12}	0.028 8	10
X_3	0.159 0	3	X_8	0.100 8	7	X_{13}	0.010 3	14
X_4	0.180 7	2	X_9	0.109 9	5	X_{14}	0.038 5	9
X_5	0.100 9	6	X_{10}	0.020 7	12			

运用模糊 Probist 故障树模型和 Posbist 故障树模型对该直流子系统进行了分析，其结果如表 4 所示。可以看出：(1)由于本文提出的 VFTA 模型充分考虑了置信区间，因此其分析结果更灵活；(2)在不同截集 λ 下，3种 FTA 模型的可靠性分析结果趋势一致，但本文的 VFTA 模型的结果差距更小，因此，其分析结果更有效。

表 4 3种 FTA 模型的结果比较

截集	模糊 Probist FTA ^[2]			Posbist FTA ^[3]	本文方法				
	下界点	中间点	上界点		a_i	a'_i	b_i	c'_i	c_i
1.0	0.248 9	0.248 9	0.248 9	0.060 4					
0.9	0.244 4	0.248 9	0.252 1	0.060 4					
0.8	0.239 9	0.248 9	0.255 3	0.060 4					
0.7	0.235 4	0.248 9	0.258 5	0.060 4	0.248 9		0.248 9		0.248 9
0.6	0.230 9	0.248 9	0.261 8	0.060 4	0.239 1	0.248 9	0.248 9	0.248 9	0.256 4
0.5	0.226 4	0.248 9	0.265 0	0.060 4	0.229 3	0.241 4	0.248 9	0.254 2	0.264 0
0.4	0.221 9	0.248 9	0.268 2	0.060 4	0.219 6	0.233 9	0.248 9	0.259 6	0.271 6
0.3	0.217 4	0.248 9	0.271 5	0.060 4	0.209 8	0.226 4	0.248 9	0.265 0	0.279 2
0.2	0.212 9	0.248 9	0.274 7	0.060 4	0.200 1	0.218 9	0.248 9	0.270 4	0.286 8
0.1	0.208 4	0.248 9	0.277 9	0.060 4	0.190 3	0.211 4	0.248 9	0.275 8	0.294 4
0.0	0.203 9	0.248 9	0.281 1	0.060 4	0.180 5	0.203 9	0.248 9	0.281 1	0.302 0

(上接第 242 页)

参考文献

[1] 李 曦, 高从英. 基于 CAN/LIN 总线的直流配电箱设计[J]. 计算机工程, 2007, 33(19): 230-232, 272.
 [2] 李海泉, 李 刚. 系统可靠性分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2003-10.
 [3] 李伯成. 嵌入式系统可靠性设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006-01.
 [4] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004-06.

(上接第 244 页)

图中每一个门电路代表 CFB 实现的功能，其序号是该 CFB 在矩阵中的位置(左上角定义为(1,1))。图 3(a)、图 3(b)即为常用的 1 位全加器的电路。

之所以能够得到多种形式的电路，其主要原因是 CFB 功能的多样性。由于每个 CFB 可以进化成具有不同运算功能的单元，当由这些功能或简单或复杂的 CFB 构成加法器时，电路就呈现出多种形式。此外，复杂的线路连接关系也是造成这种现象的主要原因之一。因此，如何能够直接进化成最简单和有效的电路将是下一步研究的主要内容。

4 结束语

通过对实验结果的分析发现，以虚拟可重构技术为基础的实验平台基本能够满足电路进化的要求，是实现硬件自演化和自修复的有效方法。其特点是采用 CFB 结构作为演化配置的基本功能单元，染色体编码短，实验中只需要 424 位，从而使实验环境得到有效的简化^[7]、演化计算量大大减少。此外，虚拟可重构电路可以用 VHDL 描述，能够生成独立于具体型号 FPGA 的 IP 软核，从而提高演化硬件的适应性和可移植性，满足其实用化的要求。

参考文献

[1] Garis H D. Evolvable Hardware: Genetic Programming of a Darwin

5 结束语

本文在分析航电设备工作特点的基础上，指出基于概率论的传统故障树模型的不足，引入 Vague 集提出一种 Vague 故障树模型。此模型能刻画出底事件失效行为的随机性与不确定性，还可以结合经验数据和专家经验等，允许一定程度的误差，为复杂工程系统的可靠性分析提供了一种新方法。

参考文献

[1] 章国栋, 陆延孝, 屠庆慈. 系统可靠性与维修性的分析与设计[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1997.
 [2] Cheng C H, Mon D L. Fuzzy System Reliability Analysis by Confidence Interval[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 56(5): 29-35.
 [3] Huang Hongzhong, Tong Xin, Zuo Mingjian. Posbist Fault Tree Analysis of Coherent Systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 84(3): 141-148.
 [4] Chen Ximing. Analyzing Fuzzy System Reliability Using Vague Sets Theory[J]. International Journal of Applied Science and Engineering, 2003, 11(1): 82-88.
 [5] Chang J R, Chang K H, Liao S H, et al. The Reliability of General Vague Fault-tree Analysis on Weapon Systems Fault Diagnosis[J]. Soft Computing, 2006, 10(8): 531-542.

[5] 饶运涛, 邹继军, 郑勇芸. 现场总线 CAN 原理与应用技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003-06.
 [6] 曹晋华, 程 侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 科学出版社, 1986-01.
 [7] 黄永安, 马 路, 刘慧敏. Matlab 7.0/Simulink 6.0 建模仿真开发与高级工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005-12.
 [8] 沈 政. 电路安全的体温计——电路可用性评估[J]. 华为服务, 2006, (2): 5-8.

Machine[C]//Proc. of Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms. Innsbruck, Austria: Springer-Verlag, 1993: 441-449.
 [2] Lambert C, Kalganova T, Stomeo E. FPGA-based Systems for Evolvable Hardware[C]//Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology. Vienna, Austria: [s. n.], 2006: 123-129.
 [3] Porter R, Bergmann N. Evolving FPGA Based Cellular Automata [C]//Proc. of Asian-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning. Canberra, Australia: [s. n.], 1998: 114-121.
 [4] Hollingworth G S, Smith S L, Tyrrell A M. Safe Intrinsic Evolution of Virtex Devices[C]//Proc. of the 2nd NASA/DOD Workshop on Evolvable Hardware. California, USA: [s. n.], 2000: 195-202.
 [5] Higuichi T. Evolvable Hardware at Function Level[C]//Proc. of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Indianapolis, Indiana: [s. n.], 1997: 187-192.
 [6] Sekanina L. Virtual Reconfigurable Circuits for Real-World Applications of Evolvable hardware[C]//Proc. of NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware. Chicago, Illinois, U.S: [s. n.], 2003: 137-166.
 [7] 原 亮, 丁国良, 吴文术, 等. 以 FPGA 和 QUARTUS 为基础平台的 EHW 环境实现[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(5): 1-3.

