

基于 FTA - FMEA 联合法综合诊断电子设备故障*

赵 雷¹⁾ 韩红新²⁾ 龚奇勇²⁾ 吴 闪²⁾(海军工程大学船舶与动力学院¹⁾ 武汉 430033) (92330 部队¹⁾ 青岛 266103)

摘 要 研究将可靠性分析理论应用于电子设备的故障诊断, 首先将电子设备的故障诊断划分为模块级和器件级两个层次, 利用 FTA 方法简化模块级诊断的搜索和推理策略, 利用 FMEA 方法建立器件级诊断中的故障字典, 两种方法的结合使用, 有效提高了诊断效率。

关键词 故障诊断; FTA; FMEA; 电子设备

中图分类号 TN406

现代电子技术飞速发展, 电子设备功能越来越完备, 其组成亦日趋复杂化和智能化, 设备中任何一个元器件的故障都可能导致部分功能或整个设备失效, 因此, 对电子设备的故障诊断复杂程度也越来越高。对设备进行失效因果分析, 可简化诊断步骤, 提高诊断效率。并可根据分析结果改进设计或改良设备, 提高电子设备可靠性。

故障树分析 (FTA) 和故障模式影响分析 (FMEA) 是对设备故障原因和结果之间关系进行分析的两种有效方法, 在机械故障分析方面已有成熟应用, 但在电子设备领域尚未推广^[1]。FMEA 与 FTA 对于故障分析来说是等效的, 但对电子设备来说, 随着复杂度大幅增加, 要从元器件的各种失效模式追踪到系统级, 研究其后果, 决定它对于系统的致命度, 其工作量将大到难以容忍的程度。对于复杂电子装备的故障诊断从诊断层次上划分主要有模块级诊断和器件级诊断^[2]。模块级诊断是把故障从系统定位到最小可更换单元 (PCB), 系统一旦发生故障, 应用 FTA 方法分析重要度大的单元, 从而确定故障监测和诊断的最优顺序, 可有效提高故障源搜寻的一次命中率, 缩短诊断的过程和时间。器件级诊断是把故障从最小可更换单元定位到元器件, 基于 FMEA 方法对模块中元器件潜在的故障模式及其对功能的影响进行分析, 建立故障字典, 可快速有效诊断出故障^[3,4]。将上述两种方法相结合进行联合分析, 优缺点互

补, 具有良好的实用性。

1 基于 FTA 的诊断推理定量分析

有关故障树的建立和简化的方法可参看 GJB768A - 1998《故障树分析指南》^[5]。图 1 为某一电子设备简化的故障树结构图。“设备故障 T”为顶事件; X_1 、 Y_1 、 Z_1 、 X_2 、 Y_2 、 Z_2 、 G 、 X_3 、 Y_3 、 Z_3 为底事件; B 、 D 、 F_1 、 F_2 、 F_3 (C) 为不同层次中间事件。在此采用定量分析方法进行故障搜寻。

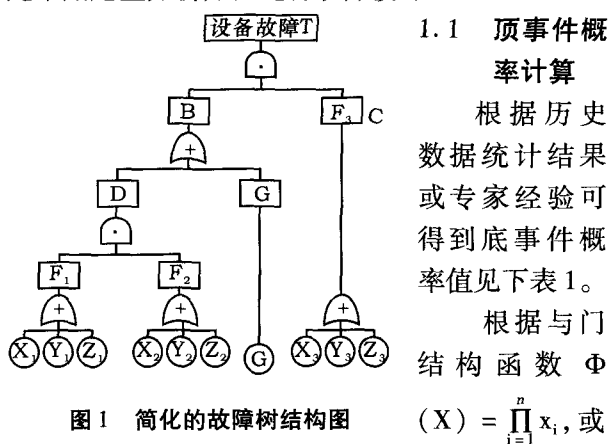


图 1 简化的故障树结构图

(X) = $\prod_{i=1}^n x_i$, 或

门结构函数 $\Phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$ 及故障树逻辑结构图可得故障树各中间事件和顶事件的概率计算如下:

$$P_{F1} = 1 - (1 - P_{X1})(1 - P_{Y1})(1 - P_{Z1}) = 0.36244;$$

$$P_{F2} = 1 - (1 - P_{X2})(1 - P_{Y2})(1 - P_{Z2}) = 0.36244;$$

* 收稿日期: 2006 年 10 月 16 日, 修回日期: 2007 年 11 月 7 日

作者简介: 赵雷, 男, 硕士生, 工程师, 研究方向为核动力装置维修工程。韩红新, 男, 工程师, 从事军用装备维修工作。龚奇勇, 男, 工程师, 从事状态监测与故障诊断工作。吴闪, 男, 工程师, 从事军用装备维修工作。

$$P_D = P_{F1} P_{F2} = 0.1314;$$

$$P_B = 1 - (1 - P_D) (1 - P_G) = 0.8263;$$

$$P_C = P_{F3} = 1 - (1 - P_{X3}) (1 - P_{Y3}) (1 - P_{Z3}) = 0.1536;$$

$$P_T = P_B P_C = 0.1269。$$

表 1 底事件概率表

事件	X_1	Y_1	Z_1	X_2	Y_2	Z_2	X_3	Y_3	Z_3	G
概率	0.3	0.080	0.01	0.3	0.080	0.01	0.1	0.050	0.01	0.8

1.2 故障树最小割集及其重要度计算

故障树最小割集的求法采用由上而下的 Fuss-

表 2 最小割集的 Fussell 表格

1	2	3	4	5
T (BC)	(DC)	(F ₁ F ₂ F ₃)	$M_1(X_1X_2X_3), M_2(X_1X_2Y_3), M_3(X_1X_2Z_3), M_4(X_1Y_2X_3), M_5(X_1Y_2Y_3), M_6(X_1Y_2Z_3),$	
	(GC)	(GF ₃)	$M_7(X_1Z_2X_3), M_8(X_1Z_2Y_3), M_9(X_1Z_2Z_3), M_{10}(Y_1X_2X_3), M_{11}(Y_1X_2Y_3), M_{12}(Y_1X_2Z_3),$	
			$M_{13}(Y_1Y_2X_3), M_{14}(Y_1Y_2Y_3), M_{15}(Y_1Y_2Z_3), M_{16}(Y_1Z_2X_3), M_{17}(Y_1Z_2Y_3), M_{18}(Y_1Z_2Z_3),$	
			$M_{19}(Z_1X_2X_3), M_{20}(Z_1X_2Y_3), M_{21}(Z_1X_2Z_3), M_{22}(Z_1Y_2X_3), M_{23}(Z_1Y_2Y_3), M_{24}(Z_1Y_2Z_3),$	
			$M_{25}(Z_1Z_2X_3), M_{26}(Z_1Z_2Y_3), M_{27}(Z_1Z_2Z_3), M_{28}(GX_3), M_{29}(GX_3), M_{30}(GZ_3)$	

表 3 最小割集的重要度

最小割集	重要度	最小割集	重要度	最小割集	重要度
$M_1(X_1X_2X_3)$	0.07092	$M_2(X_1X_2Y_3)$	0.0354	$M_3(X_1X_2Z_3)$	0.00709
$M_4(X_1Y_2X_3)$	0.0189	$M_5(X_1Y_2Y_3)$	0.00946	$M_6(X_1Y_2Z_3)$	0.00189
$M_7(X_1Z_2X_3)$	0.00236	$M_8(X_1Z_2Y_3)$	0.00118	$M_9(X_1Z_2Z_3)$	0.000236
$M_{10}(Y_1X_2X_3)$	0.0189	$M_{11}(Y_1X_2Y_3)$	0.00946	$M_{12}(Y_1X_2Z_3)$	0.00189
$M_{13}(Y_1Y_2X_3)$	0.00504	$M_{14}(Y_1Y_2Y_3)$	0.00252	$M_{15}(Y_1Y_2Z_3)$	0.000504
$M_{16}(Y_1Z_2X_3)$	0.000630	$M_{17}(Y_1Z_2Y_3)$	0.000315	$M_{18}(Y_1Z_2Z_3)$	0.000063
$M_{19}(Z_1X_2X_3)$	0.00236	$M_{20}(Z_1X_2Y_3)$	0.00118	$M_{21}(Z_1X_2Z_3)$	0.000236
$M_{22}(Z_1Y_2X_3)$	0.00063	$M_{23}(Z_1Y_2Y_3)$	0.000315	$M_{24}(Z_1Y_2Z_3)$	0.000063
$M_{25}(Z_1Z_2X_3)$	0.0000788	$M_{26}(Z_1Z_2Y_3)$	0.0000394	$M_{27}(Z_1Z_2Z_3)$	0.00000788
$M_{28}(GX_3)$	0.63	$M_{29}(GX_3)$	0.315	$M_{30}(GZ_3)$	0.063

1.3 结果分析

从计算数据可见不同割集的重要度值相差很大,如取最小割集的重要度值大于 0.01 的最小割集,这时真正候选故障源只有 M_1 、 M_2 、 M_4 、 M_{10} 、 M_{28} 、 M_{29} 、 M_{30} 7 个,尽管这 30 种最小割集都可能是引起顶事件的发生原因,但实际上从最小割集的重要程度来看,其它 23 种最小割集发生的可能性很小。这 7 种故障模式的最小割集重要度依大小排序为: $M_{28} > M_{29} > M_{30} > M_1 > M_2 > M_4 > M_{10}$,因此故障诊断时,只需依次测试这 7 个最小割集即可,从而大大减小诊断的复杂程度,同时也使故障源搜寻的一次命中率大为提高,避免了诊断测试的盲目性,省去了测试过程和时间。此外,从所有候选的故障模式中还可以看出,尽管底事件 X_3 的发生概率只有 0.1,小于底事件 X_1 、 X_2 、G 的发生概率,但它在候选故障源中出现次数最多,说明其对顶事件的故障发生贡献较大,也是诊断时应该关

注的因素。
sell 法,其步骤见表 2。它是根据逻辑与门仅增加割集容量,而逻辑或门才增加割集个数的性质,由上而下遇到与门就把与门下面所有输入事件都排列于一行,遇到或门就把或门下面所有输入事件都排列于一列,依此类推,直到不能分解为止。从中可知最小割集数为 30,即有 30 种故障模式。此时实际故障树可简化为此 30 种故障模式与顶事件的或门逻辑关系。当顶事件发生时,各最小割集重要度可根据公式 $P_{M/T} = P_M/P_T$ 计算,从而得到各故障模式即最小割集的重要度见表 3。

注的因素。

2 基于 FMEA 建立故障字典

FMEA 的主要分析工作是通过填写表格来完成的,《GJB1391 故障模式、影响及危害性分析程序》推荐设计分析使用的典型 FMEA 表格形式如表 4 所示^[6]。

在此我们简化为下表 5 来对功能模块(PCB)中各元器件潜在的故障模式及其对模块功能的影响进行分析。

我们定义一个变量 - 故障模式影响率 $\gamma = c \times a\alpha \times b\beta$ 。其中: α 为故障模式频数比; β 为故障率; a 为 α 的权值(由专家经验或历史数据统计确定); b 为 β 的权值(由专家经验或历史数据统计确定); c 为元器件故障模式对功能模块的量化值。通过 FMEA 可计算故障模式影响率。在用 PCB 的

表 4 典型故障模式影响分析表

代 码	产品或 功能标志	功 能	故障 模式	故障 原因	任务阶 段与工作 方式	局部 影响	故障影响		故障 检测 方法	补偿 措施	严酷度 类型	备 注
							高一 层影响	最终 影响				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

故障字典法测试前,可按故障模式影响率的大小选择故障集,优化测试节点。在多故障字典法诊断中,可综合 FMEA 的故障模式频数比和故障率,合理地选择一些多故障组合。应用此方法,可减少测前分析的工作量,提高建立故障字典的效率。

表 5 简化的故障模式影响分析表

元 器 件	型 号	功 能	故障模式 及原因	故障模式对 上一级的影响	故障模式 频数比	故障率
1	2	3	4	5	6	7

3 结语

基于可靠性分析理论对电子设备进行故障诊断,将系统的故障诊断划分为模块级和器件级两个层次上分别进行分析,利用 FTA 方法简化模块级诊断的搜索和推理策略,利用 FMEA 方法优化器件级诊断中故障字典的建立,充分发挥故障树分析

方法和故障字典法的优点,极大地提高了诊断效率。除此之外,上述分析可以掌握电子设备的可靠性薄弱环节,进而通过改进设计或改良设备,比如采用冗余设计消除单点失效等手段,有效提高电子设备的可靠性。

参 考 文 献

- [1]周海京.故障模式.影响及危害性分析与故障树分析[M].北京:航空工业出版社,2003
- [2]朱大奇.电子设备故障诊断原理与实践[M].北京:电子工业出版社,2004
- [3]曾声奎,赵廷弟,张建国等.系统可靠性设计分析教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001
- [4]王永川.可靠性分析技术在电子装备故障诊断中的应用[J].上海海运学院学报,2001(3):167~178
- [5]GJB768A-1998.故障树分析指南
- [6]GJB1391-92.故障模式、影响及危害性分析程序

(上接第 82 页)

换的时频分析特性,提出了将能量聚集度准则应用到频移非抽取性小波包变换算法中,对干扰进行最有效的跟踪和定位,然后对受扰的频段对应系数置零,已达到抑制干扰的目的的思想。仿真结果表明,但该算法具有良好的窄带干扰抑制特性。

参 考 文 献

- [1]E. Pardo, J. J. Pérez, and M. A. Rodríguez. Interference excision in DSSS based on undecimated wavelet packet transform[J]. Electron. Lett., 2003,39(21):1543~1544
- [2]M. V. Tazebay, , and A. N. Akansu. Adaptative sub-band transforms in time - frequency excisers for DS - SS communications systems[J]. IEEE Trans. Signal Process, 1995, 43, (11): 2776~2782

- [3]杨慰民,毕光国.基于自适应小波包变换的直接序列扩频通信窄带干扰抑制技术[J].通信学报,1999,20(7):69~75
- [4]郭经红,程时昕. DSSS 系统中自适应小波包干扰抵消器[J].通信学报,2001,22(7):18~25
- [5]Stephane Mallat. A Wavelet Tour of Signal Processing (Second Edition)[M]. 北京:机械工业出版社,2002,9
- [6]R. C. DiPietro. An FFT - based technique for suppressing narrow - band interference in PN spread - spectrum communications systems[C]. in ICASSP 89, Glasgow, Scotland, U. K. , 1989:1360~1363
- [7]P. T. Capozza, B. J. Thomas, T. M. Hopkinson, and R. L. Landrau. A Single - Chip Narrow - Band Frequency - Domain Excisor for a Global Positioning System (GPS) [J]. IEEE Journal of Solid - State Circuits, 2000,35(3):401~411