

引用格式:刘基强,张改丽,黄姣英,等.基于改进 FMECA 与故障传播模型结合的中子单粒子故障源定位分析[J].微电子学与计算机,2020,37(8):32-36. [LIU J Q, ZHANG G L, HUANG J Y, et al. Location analysis of neutron single particle fault source based on improved FMECA and fault propagation model[J]. Microelectronics & Computer, 2020, 37(8): 32-36.]

基于改进 FMECA 与故障传播模型结合的中子单粒子故障源定位分析

刘基强¹, 张改丽², 黄姣英¹, 刘荣昌², 张明杰¹

(1 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191; 2 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘 要: 随着器件加工工艺技术的不断发展, 器件单元尺寸逐渐缩小, 工作电压不断下降, 使得器件抵挡单粒子效应的能力也在不断降低. 针对某无人机用机载数据采集计算机, 分析在大气中子辐射下数据采集计算机的故障传播机理. 结合改进的 FMECA 方法, 基于原因故障、结果故障以及原因故障对结果故障的贡献率, 建立了计算机的故障传播图, 通过逐层推理求得各底层故障模式发生概率, 进而提出一种可能高风险源定位方法, 定位到系统级可能的高风险故障源为数采计算机上两块单机板的核心器件 FPGA.

关键词: 中子单粒子效应; 故障传播模型; 改进 FMECA; 故障源定位

中图分类号: TN406

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2020)08-0032-06

Location analysis of neutron single particle fault source based on improved FMECA and fault propagation model

LIU Ji-qiang¹, ZHANG Gai-li², HUANG Jiao-ying¹,
LIU Rong-chang², ZHANG Ming-jie¹

(1 School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2 Laboratory of North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: With the continuous development of components processing technology, the size of components unit is constantly reduced, and the working voltage is constantly reduced, so that the components' ability to resist single event effect is constantly reduced. This paper analyzes the fault propagation mechanism of the airborne data acquisition computer for an unmanned aerial vehicle (uav) under atmospheric neutron radiation. Combined with the improved FMECA method, based on the cause failure, the result failure and the contribution rate of the cause failure to the result failure, the fault propagation diagram of the computer is established, and the probability of occurrence of each underlying failure mode is obtained through layer-by-layer reasoning. A possible high-risk source location method is proposed. The possible high-risk fault source located at the system level is the core device FPGA of two single-boards on the computer.

Key words: neutron single event effect; fault propagation model; improved FMECA; fault source location

1 引言

中子单粒子效应 NSEE (Neutron Single Event

Effect) 指大气中的高能中子入射到半导体内, 引起器件发生各种扰动和损伤现象. 飞行器在临近空间航行会遇到非常恶劣的大气辐射环境, 使得机载电

子设备出现存储数据错误、器件功能异常及系统死机等故障,在大气辐射环境当中对机载电子设备影响最大的因素就是大气高能中子^[1]. NSEE 严重影响了机载电子设备的稳定性、维修性、工作寿命、可靠性等,甚至会危及飞机上机组人员生命,这一事实已受到国际航空界的广泛重视.

中子辐射效应会导致严重后果^[2].

经调研 JEDEC 89A《阿尔法粒子和地面银河宇宙射线在半导体器件中诱发软错误测量报告》^[3]、Xilinx 公司关于 FPGA 的试验报告以及其他机构试验报告^[4]等,在常见的微型集成电路中,PowerPC 处理器、SRAM 型 FPGA 器件、SRAM 型存储器是对单粒子翻转最敏感的器件. 张明杰^[4]等通过对某型无人机用数据采集计算机进行中子单粒子效应敏感性分析,得到在机载数据采集计算机上,对单粒子翻转敏感的器件有 PC8245 芯片、FPGA 器件和 DDR2 存储器.

传统的 FMECA 定量方法主要有危害性矩阵法和风险优先系数(RiskPriorityNumber, RPN)法,基本思想都是综合考虑故障可能性及严重程度的影响,对故障模式进行排序,找出更重要的故障模式^[6]. 邹安南^[7]等采用改进的 FMECA 方法,针对数控机床系统,给出基于维修成本的危害度,有针对性的提升了机床运行可靠性. Wang^[8]等提出了一种改进的、可量化的 FMECA 方法,成功的运用于某工程装备的修复性维修领域. 张红旗^[9]等提出了一种改进 FMEA 与故障传播模型结合的故障诊断方法,有效识别出某系统的主要故障模式和关键零部件.

本文采用一种改进的 FMECA 方法,在传统的 FMECA 表格中添加故障原因以及原因故障的贡献率两列,建立了计算机的故障传播模型,通过逐层推导得到原因故障的发生概率,并提出了一种故障源定位方法,以某无人机用机载数据采集计算机为例,定位到其系统的可能的低风险故障源为 FPGA 器件.

2 结合改进 FMECA 的故障传播模型

2.1 基于改进 FMECA 故障传播建模

本文采用的故障传播模型(Failure Propagation Model, FPM)方法结合了改进的 FMECA 方法^[9],通过 FMECA 分析系统各故障模式之间的因果关系,利用底层故障模式发生概率或故障原因对后果故障的贡献率,建立故障模式之间定性或者定量传递关系,然后建立系统的故障传播模型. 在已知最终

的表象故障模式基础上,分析原因故障中各故障模式的发生概率,定位发生概率最大的器件,该器件为可能的高风险故障源.

本文假设故障 A、B 为某系统的两种故障,且在这两个故障之间存在“A→B”的关系,即故障 A 发生可能导致故障 B 发生. 故障 A 为原因故障,故障 B 为后果故障,用 Con_r 表示故障 A 导致故障 B 发生的概率大小,并定义为原因故障 A 对后果故障 B 的贡献率. 实际上,原因 A 可能受到多个故障 A_n ($n=1,2,\dots,n$)的共同作用,只有在 A_n 都发生,才能导致故障 B 发生.

图 1 表示故障传播模型原理图,图 1(a)为单原因故障的传播模型,(b)为多因故障的传播模型. 如图所示,圆圈代表故障模式,箭头代表故障传播方向, Con_r 值代表贡献率大小.

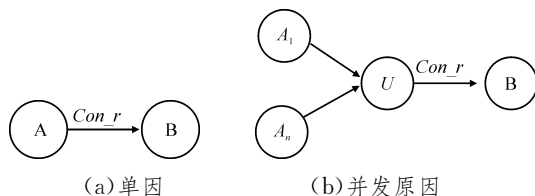


图 1 故障传播模型

本文假设每个原因故障都是互斥的,且每个结果故障 B 的所有原因故障的贡献率相加等于 1,并且这些贡献率有如下的关系式:

$$\sum_{i=1}^I Con_r_{A_i \rightarrow B} + \sum_{j=1}^J Con_r_{U_j \rightarrow B} = 1 \quad (1)$$

式中, i 和 j 分别代表单因故障和并发原因故障的总数目.

本文假设每个故障只由单原因导致,故障之间的传播没有并发原因存在,即在式(1)中只考虑单因故障. 事实上在实际工程中,并发原因也是经常存在的,即故障 B 可能由单个原因和并发原因同时导致. 若考虑并发原因的影响,用 $Pr(x)$ 表示故障 x 的发生概率,则单因和并发原因故障的表达式分别如下:

$$\begin{cases} Pr(A) = Pr(B) * Con_r_{A \rightarrow B} \\ Pr(A_1) = \dots = Pr(A_n) = Pr(\bigcup) Pr(B) * Con_r_{U \rightarrow B} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,可以根据结果故障和贡献率求出原因故障发生概率. 但是有时很难得到原因故障的贡献率,可以参照相关标准或者通过实验数据获得底层元器件故障模式的发生概率,所以在式(2)的基础上,可推导出(3),在已知某表象或结果故障的情况下,若知道原因故障的发生概率,便可求得原因故

障对结果故障的贡献率,完善故障传播图.

$$\begin{cases} Con_{r_{A \rightarrow B}} = Pr(A)/Pr(B) \\ Con_{r_{A_n \rightarrow B}} = Pr(A_n)/Pr(B) \end{cases} \quad (3)$$

FPM 描述了故障之间的因果关系,在一个特定系统中,各故障模式之间关系复杂,互相影响,某故障的原因故障可能为另一故障的结果故障,各个故障的 FPM 交叉迭代,形成系统的故障传播网络,定义为系统的故障传播图 (Failure Propagation Graph, FPG). 系统的 FPG 直观反映了系统中各故障的传播关系,便于故障传播分析.

2.2 基于 FPG 的可能高风险源定位方法

本文基于系统的 FPG 来定位可能高风险源,系统的可能高风险源定位就是指在系统的故障传播模型中,某器件的故障模式发生概率最大,且这些故障模式为系统的底层故障模式. 各原因故障的发生概率可以在系统 FPG 中,根据公式(2)逐层推导求得,确定可能高风险源有助于对系统进行防护设计.

由于设备系统中存在复杂的故障传播关系,各故障之间可能存在耦合关系,同时原因故障之间可能存在累积效应,所以本文在进行高风险定位前做出如下假设:

- (1)系统中原因故障与结果故障不会相互影响,结果故障的发生不会影响原因故障;
- (2)系统中原因故障之间互斥;
- (3)系统中每个结果故障都是由单因故障引起,原因故障之间没有累积效应;

图 2 为定位可能高风险的流程. 确定可能的高风险源步骤如下:

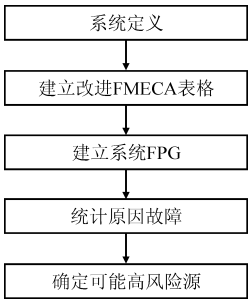


图 2 确定可能高风险源流程图

(1)系统分析和定义. 确定分析对象的主要任务、功能和工作方式,然后分析产品在给定任务下所有可能的故障模式、原因以及影响.

(2)建立改进的 FMECA 表. 在传统的 FMECA 表格基础上,确定故障模式之间的因果关系,以及原因故障对于结果故障的贡献概率.

(3)建立系统 FPG. 基于改进的 FMECA 表格,通过故障模式之间的因果关系建立系统故障传播图.

(4)统计原因故障. 在系统 FPG 中,通过逐层推导求得各个底层故障的发生概率.

(5)确定可能高风险源. 统计各底层故障的发生概率,器件的发生概率为器件不同的故障模式发生概率之和,对器件发生概率进行排序,确定发生概率最高的器件为可能的高风险源.

图 3 为某系统的故障传播图,图中每个节点代表一个故障模式,每个故障都是由单因故障导致的,若已知 D 为表象故障即 $Pr(D)=1$,则根据故障传播模型的贡献率,可以逐层推导出底层故障(原因故障)的发生概率,即 $Pr(A_1)=0.35, Pr(A_2)=0.28, Pr(B)=0.37$. 由于 A_1, A_2 为器件 R 的两种故障模式,由于本文假设故障模式之间没有并发原因,器件的各故障模式之间为串联关系,即任一个故障模式发生都会导致器件发生故障,故器件 R 的发生概率为 A_1, A_2 故障模式发生概率之和, $Pr(R)=0.63$. 所以在表象故障 D 已知的情况下,器件 R 的发生概率最大,定义器件 R 为导致表象故障 D 的可能的低风险故障源.

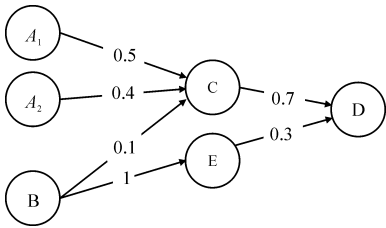


图 3 某系统故障传播模型

3 案例分析

3.1 数据采集计算机

本文选用的某型无人机用数据采集计算机主要用于地面高度信息的采集与记录,以及地理位置、气压、弹道等的采集与分析. 数据采集计算机的组成主要包含 PMC8245 功能单机板和 GIO 功能单机板. 其结构功能示意图见文献[5].

PMC8245 功能单机板主要通过 PCI 接口与 GIO 板进行通信(包括数据、地址、离散量等传输); PMC8245 利用 XC3S400AN-4FGG400I 型 FPGA 访问 Flash memory、SDRAM、NVRAM 等存储器结构;PC8245 保留 JTAG 调试接口,通过仿真器可以与上位机相连,实现仿真软件观测 CPU 内部状

态(包括核内寄存器、配置寄存器、cache 等状态)。

GIO 功能单机板的核心器件是 XC4VFX60-11FF1152I 型 FPGA,主要通过 PCI 接口、离散量、模拟量接口,实现数据地址传输、离散量、模拟量采集,以及离散量输出功能. GIO 功能单机板通过 FPGA 控制的 PCI 总线与外部接口进行数据交互,PMC8245 功能单机板通过 PCI 总线与 GIO 功能单机板连接,通过 PMC 接口访问 GIO 功能单机板双口存储器,实现与 GIO 功能单机板的数据交互.

3.2 数采计算机可能高风险源定位

数采计算机主要功能是对无人机飞行过程中各种模拟信号进行采集、记录和传输,无人机在临近空间飞行过程中,会受到中子单粒子辐射的影响,单粒子效应对数采计算机不同器件影响不同,通过对系统功能及故障逐层分析,可得数据采集计算机受单粒子效应影响的 FMECA 表格^[5]如表 1 所示.

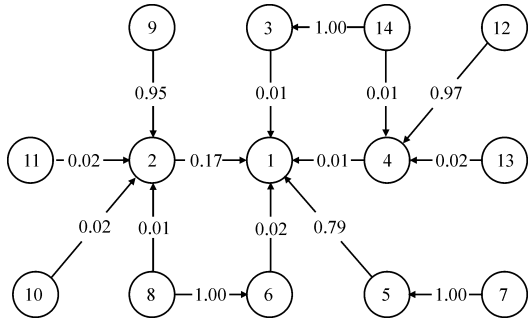


图 4 数采计算机故障传播图

基于表 1 建立的改进的 FMECA 表格,通过“故障原因”一列,建立数采计算机系统的故障传播图,如图 4 所示. 其中,各个节点代表一个故障模式,节点数字代表故障所对应的代码,节点之间的边代表故障模式之间的因果联系,边的属性为原因故障对结果故障的贡献率大小.

根据故障传播图以及公式(2),在已知故障 1 为表象故障的情况下,即 $Pr(1) = 1$,可通过故障传播图逐层递推求得各原因故障模式的发生概率,如图 5 所示.

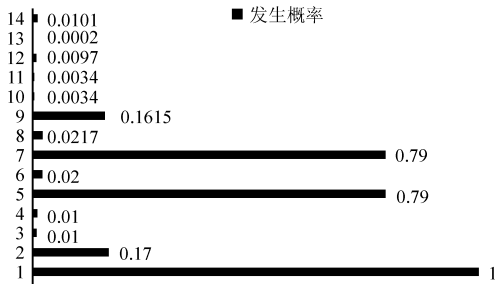


图 5 受单粒子效应影响的 FMECA 图

根据图 5,故障 7 和故障 5 的发生概率最大,又故障 7 为故障 5 的原因故障,所以原因故障 7 的发生概率最高. 针对数据采集计算机故障传播模型,系统受中子单粒子效应影响的可能故障源集合为单粒子敏感器件,即 PowerPC 微处理器,FPGA,DDR2. 表 2 列出了三个敏感器件的发生概率.

表 1 故障模式发生概率						
故障代码	故障模式	严酷度	难检度	故障原因	贡献率	危害度
1	设备无法完成近地预警	I	1	[2;3;4;5;6]	[0.17;0.01;0.01;0.79;0.02]	0.17
2	无数据输出	II	1	[8;9;10;11]	[0.01;0.95;0.02;0.02]	0.13
3	无数据记录	II	2	[14]	[1.00]	0.23
4	记录错误数据	II	3	[12;13;14]	[0.97;0.02;0.01]	0.35
5	连续性输出错误数据	II	2	[7]	[1.00]	0.20
6	间歇性输出错误数据	III	2	[8]	[1.00]	0.17
7	FPGA 单粒子翻转	II	5			0.50
8	FPGA 单粒子瞬态	IV	4			0.13
9	FPGA 单粒子闩锁	IV	2			0.03
10	FPGA 单粒子功能中止	IV	2			0.07
11	PowerPC 单粒子翻转	II	5			0.50
12	DDR2 单粒子翻转	II	5			0.50
13	DDR2 单个位硬错误	IV	2			0.07
14	DDR2 单粒子功能中止	IV	2			0.03

表 2 敏感器件发生概率

敏感器件	故障模式	故障模式 发生概率	器件发生 概率
FPGA	FPGA 单粒子翻转	0.790 0	0.976 6
	FPGA 单粒子瞬态	0.021 7	
	FPGA 单粒子闩锁	0.161 5	
	FPGA 单粒子功能中止	0.003 4	
PowerPC	PowerPC 单粒子翻转	0.003 4	0.003 4
	DDR2 单粒子翻转	0.009 7	
DDR2	DDR2 单个位硬错误	0.000 2	0.020 0
	DDR2 单粒子功能中止	0.010 1	

据表 2 可以看出,在已知表象故障的情况下,FPGA 器件的发生概率最大,定位为可能的高风险故障源,需要对其进行单粒子效应防护。

4 结束语

本文主要针对某无人机用数据采集计算机,在器件层次分析其在中子单粒子效应影响下的故障模式,基于计算机受单粒子效应影响的改进 FMECA 表格,构建了计算机故障传播模型,通过分析故障传播图,定位到数据采集计算机中两块功能单板上的 FPGA 器件为可能的高风险源,需要对其进行重点防护。

参考文献:

[1] IEC 62396-2, Process Management for avionics: Atmosphere Radiation Effects. Part2: Guidelines for Single Event Effects Testing for Avionics Systems [S]. Switzerland, The InternationalElectrotechnical Commission (IEC),2011.

[2] YANG W T, LI Y H, LI Y, et al. Atmospheric neutron single event effect test on Xilinx 28 nm system on chip at CSNS-BL09[J]. Microelectronics Reliability, 2019,99(8):119-124.

[3] HEIJMEN T, REMI G, SLAYMAN C, et al. Soft

Errors in Modern Electronic Systems[M]. Springer US, 2011:55-76.

[4] NORMAND E, DOMINIK L. Cross Comparison Guide for Results of Neutron SEE Testing of Microelectronics Applicable to Avionics[C]// 2010 IEEE Radiation Effects Data Workshop, Denver, CO, USA: IEEE,2010: 8-8.

[5] ZHANG M J. Research on fault neutron induced single event effect caused by propagation mechanism of airborne electronic equipment[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2018.

[6] WANG H Z, LI G S. Demand analysis method of electronic equipment fault diagnosis based on FMECA [J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37 (9): 29-31.

[7] ZOU A N, WANG H J, GAO Y J. Reliability evaluation and promotion of machine tool running based on improved FMECA[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2018, 33 (3): 31-35.

[8] WANG Y H, DENG C, WU J, et al. A corrective maintenance scheme for engineering equipment [J]. Engineering Failure Analysis,2014,36(1):269-283.

[9] ZHANG H Q, SHAO X D, SUN C, et al. Integrated fault diagnosis method based on improved FMEA and failure propagation model[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017,36(1): 23-28.

作者简介:

刘基强 男,(1997-),硕士研究生.研究方向为电子元器件可靠性分析. E-mail:18101278974@163.com

黄姣英 女,(1977-),博士,高级工程师.研究方向为元器件可靠性评价.

张明杰 男,(1994-),博士研究生.研究方向为电子元器件可靠性.

(上接第 31 页)

[13] WANG S, ZHANG W, YAO Y, et al. Effect of Field Plate Structure on Electric Field Distribution of Al-GaN/GaN HFET [J]. China Sciencepaper, 2014, 9 (7): 739-741.

作者简介:

李 佳 男,(1995-),硕士研究生.研究方向为氮化镓功率

半导体器件及应用. E-mail:18180603561@163.com.

陈万军 男,(1978-),博士,教授,博士生导师.研究方向为新型功率半导体器件与集成技术.

孙瑞泽 男,(1990-),博士后.研究方向为新型功率半导体器件及应用.

信亚杰 男,(1993-),博士研究生.研究方向为新型功率半导体器件.