

故障诊断与硬件演化的一体化设计

张峻宾, 蔡金燕

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 提出将硬件演化技术融入于故障诊断技术之中的设计方案, 充分利用硬件演化技术具有的自组织、自适应、自修复等优点, 避免了进行精确的故障定位, 从而实现故障的自修复。对基于硬件演化技术实现故障自修的前提条件进行了分析, 并提出了演化字典理论, 使故障诊断与硬件演化有机结合起来, 拓展了现有故障自修复的技术手段。

关键词: 故障诊断; 硬件演化; 自修复; 演化字典

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)02-0094-04

Integrated Design for Fault Diagnosis and Hardware Evolution

ZHANG Jun-bin, CAI Jin-yan

(Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: According to the phenomenon, an integrated design program was advanced which combines fault diagnosis with Hardware Evolution. By making full use of the advantage about Evolvable Hardware (EHW), like self-organizing, adaptive, self-repair and so on, accurate faults location was avoid so as to realize the self-repair of faults. The preconditions of achieving faults self-repair based on EHW were analyzed, and the theory of Evolution Dictionary was advanced. By combing fault diagnosis with EHW organically, the available technology methods of faults self-repair are extended.

Key words: fault diagnosis; hardware evolution; self-repair; evolution dictionary

1 引言

故障测试是为了确定电子电路存在故障的一系列操作技术, 是故障诊断的关键步骤, 其能够为后面的 EHW 提供决策信息。硬件演化是实现故障自修复的一种手段, 能够使电路系统恢复正常工作状态。

可编程器件(主要指 FPGA)是 EHW 实现的硬件基础, 演化算法是 EHW 实现的手段^[1]。现阶段故障诊断相关理论和实践研究都达到了一定的高度, 而硬件演化理论起步的较晚, 利用容错冗余设计能够在一定程度上达到故障自修复的目的, 而将硬件演化和故障自修复相结合, 不仅完善了故障自修复的理论, 更使故障自修复技术上升到了一个更高的层面。

充分利用 EHW 具有自组织、自适应、自修复的优点, 避免对可编程芯片进行精确的故障定位, 这将大大降低故障自修复的技术难度。这也是基于 EHW 实现故障自修复的优越性^[2]。

2 EHW 基本原理

基于硬件演化(Evolvable Hardware)能够成功解决数字系统的故障诊断和自修复问题^[3]。

硬件演化的公式定义为

$$EAs + PLDs = EHW,$$

即: 演化算法 + 可编程逻辑器件 = 硬件演化^[4]

EHW 以演化算法(Evolvable Algorithm, EA)为组合优化和全局搜索工具, 其通过模拟进化来获得具备预期功能的电路和系统结构, 并不依赖先验

收稿日期: 2013-03-20; 修回日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目“电子产品性能退化试验与故障趋势预测研究”(61271153)

知识,也不需要人工干预.可编程逻辑器件(Programmable Logic Device, PLD)是实现硬件演化的硬件基础,为数字电路故障诊断和自修复开辟了一条新途径.其应用已经扩展到众多领域.

3 故障诊断系统设计

对含有可编程器件电路板进行故障诊断.需要实时检测电路的输出信号,当发现输出信号与预期输出不一致的时候,触发故障诊断系统,分析并确认所出现的故障是否符合故障自修复的前提.故障诊断系统通过数字电路故障诊断方法,实现故障诊断^[4].

首先激活边界扫描系统,对FPGA芯片进行边界扫描,查看FPGA芯片是否存在桥接故障^[5].当确认芯片引脚存在桥接故障,或者确认与芯片引脚直接相连的可编程单元存在物理损坏故障,此时不能通过EHW技术实现故障的自修复.如果确认以上两种故障,此时就需要对芯片内部单元进行故障测试,确认故障出现在芯片内部可编程逻辑单元之中,毕竟边界扫描技术进行故障诊断的能力也有限制.

3.1 含FPGA电子系统可出现的故障分类

当今的电子电路系统基本上都含有FPGA芯片,对于这样的电子电路出现的故障不一定能够实现自修复.首先需要对这样的电子电路系统可能出现的故障进行整理分类.

第一类故障是存在于FPGA芯片之外的故障.一个电子系统不可能孤零零的只含FPGA芯片,其还包括其他的芯片或者电子元器件,而这些元器件都不含有可编程逻辑阵列.

第二类故障是存在于FPGA芯片内部的.一是逻辑资源的故障;二是连线资源的故障.当按照表现形式来分类,可分为静态故障(static faults)和动态故障(dynamic faults).当按照故障性质来分可分为暂态性故障(temporary faults)和永久性故障.

静态故障也可称为硬故障,即硬件结构出现的不可改变的故障,可称为硬故障,亦称为不可恢复的故障.同时也属于永久性故障.固定型故障(stuck faults)、桥接故障(bridge faults)、开路或断线(stuck open)、可编程开关的常开故障(stuck off)和电源故障均属于静态故障.

其中桥接故障是指连线之间发生短路(多指一个器件相邻连线之间的短路)的故障.此时电路的拓扑结构发生了改变,而电路或系统的基本功能也可

能随之发生根本性的变化.而暂态故障是相对固定型故障而言的,其主要分为瞬态故障(transient faults)和间歇性故障(intermittent faults).

3.2 有冗余的电路进行故障测试设计

对有冗余的电路进行故障诊断,可以进行离线的故障诊断,也可进行在线的故障诊断.

针对含FPGA芯片的电子电路系统,一般情况下芯片含有冗余,常用的为三模冗余(Triple Module Redundancy, TMR)模式^[6].冗余有两个层面:一是一片FPGA内部含有TMR模式,二是除主用芯片外,还含有三个备份FPGA芯片,此时主用芯片和备份芯片配置完全一样^[7].

如图1和图2所示,可编程电路都存在冗余,当是片内TMR模式电路的时候,可以将判决器设置在芯片内,也可以在芯片外围设置判决器.当判决器在芯片内部的时候,要正确的对三个电路输出进行判决,首先要保证判决器是正常工作的.

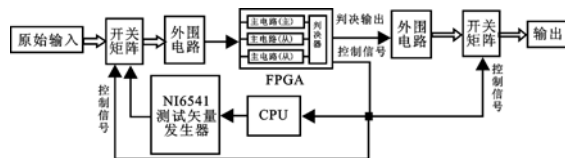


图1 片内TMR的在线故障诊断框图

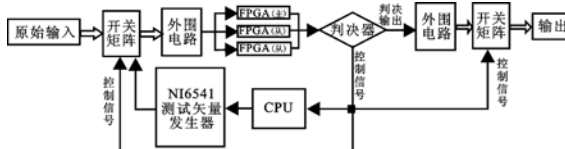


图2 片外TMR的在线故障诊断框图

矩阵开关的作用是将问题电路从工作的电子设备上分离出来,并能够接入故障测试系统.NI6541的目的就是产生测试序列,对内部电路进行测试.

控制信号发生器的作用是产生“控制信号”.控制信号是判决器在进行电路故障判决之后产生的信号.控制信号可以由FPGA产生,也可以由外围电路判决其产生.

产生的控制信号一路送两个开关矩阵,一路送CPU.控制信号控制开关矩阵是否和原始输入、输出断开,同时将NI6541数字信号发生器通过开关矩阵和外围电路连接;而控制信号送CPU,使CPU产生一个控制信号,控制NI6541数字信号发生器,使NI6541产生测试信号.

测试信号是在控制信号触发CPU之后,由CPU控制NI6541产生.设计中测试信号发生器采用NI6541数字信号发生器,其能够完全由程序控制,由CPU控制产生测试信号.

NI6541 时钟速率最大为 100 Hz, 且有 32 路可进行方向控制的通道, 可选电压 NI 同步内存核心设备与 5.0 V、3.3 V、2.5 V、1.8 V 电压兼容, 每个通道有 1 Mb、8 Mb 或 64 Mb 的板载内存. 在 CPU 内部, 对被测电路进行各种故障模式的仿真, 通过仿真产生测试矢量, 产生测试矢量的具体技术不再赘述.

测试矢量也可以由 MATLAB 等程序计算得出, 整个过程由 CPU 控制, 在计算出测试矢量后通过串口通信, 将其送入被测电路.

3.3 无冗余的电路进行故障测试设计

无冗余的电路进行故障诊断, 诊断方法和有冗余电路的诊断方法所有差异. 其只能实现离线的诊断. 值得注意到是, 有冗余的电路也可当作无冗余的电路进行故障诊断.

如图 3 所示, 在被测电路系统在线工作的时候, 实时检测被测电路的输出, 将输出与 CPU 发出的预期值进行比较, 比较由判决器实现. 如果存在故障, 比较器比较的结果送入 CPU, 在 CPU 接收到故障判决信号后, 先产生一个控制信号, 并且计算电路的测试信号. 控制信号的作用是断开开关矩阵, 使被测电路离线. 测试信号同样可由相关程序计算得出, 由 NI6541 仪器产生. 故障诊断的时候也首先要诊断 FPGA 芯片管脚是否存在故障, 如果不是, 再诊断是否是芯片外围电路存在故障, 最后诊断是否是芯片内部存在故障.

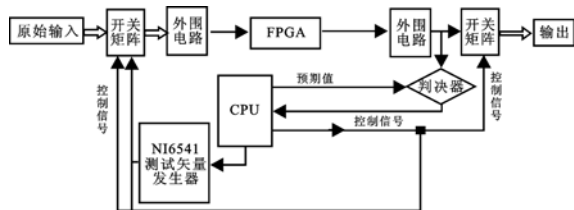


图 3 无冗余电子电路故障诊断框图

注意, 在将输出信号引入判决器的时候, 需要添加隔离电路. 如果没有隔离电路, 原电路工作输出端的电平将会受到采样系统的影响.

4 故障诊断与 EHW 的一体化设计

4.1 基于 EHW 的故障自修复前提条件

基于 FPGA 的电子电路系统, 其出现的故障不是在任何时候都能完全实现自修复.

在 3.1 节已经对含 FPGA 芯片的电子系统可能出现的故障进行了分类, 第一类故障不能实现故障自修, 而第二类故障中的桥接故障也是不能实现

故障自修复, 瞬态故障是由于电源干扰或宇宙射线 (多为 α 粒子) 引起的, 不是由硬件本身引起的^[8]. 间歇性故障是可重复出现的非故障定性故障. 其产生的原因主要包括以下几个方面: 元件参数变化、温湿度的影响、焊点虚焊等. 间歇性故障不是一直存在的, 当使用环境改变的时候, 间歇性故障可能恢复. 出现的其他故障可以利用 EHW 技术实现自修复, 此时就会充分利用其具有的自组织、自适应能力.

但是在进行故障自修复之前, 需要确定所使用的芯片的可编程逻辑资源算法存在冗余. 如果不存在冗余, 或者故障单元的数目已经超出了冗余单元的数目, 这些故障也不能实现自修复.

4.2 基于 EHW 的自修复系统设计

图 4 是基于 EHW 的自修复系统设计的流程图, 需要先进行故障测试, 对电子系统所出现的故障进行分析, 判断是否符合 4.1 节所述的可实现故障自修复的前提条件. 在满足前提条件的情况下, 启动演化算法, 下载新的结构位串进行电路故障测试. 如果不满足, 再次进行演化, 如果在达到最大演化次数时仍然存在故障, 则宣告故障自修复失败, 否则即为成功.

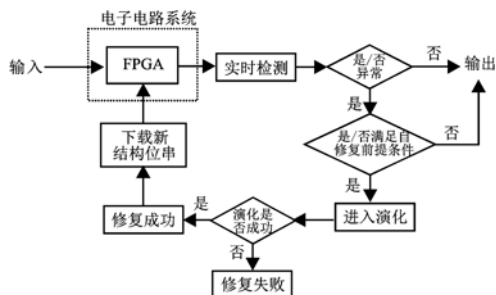


图 4 基于 EHW 的自修复系统设计流程图

在此过程中不需要对 FPGA 内部的可编程逻辑资源进行精确的故障定位, 这正是 EHW 技术实现故障自修复的优越性所在.

演化算法可以在多种软件上实现, 如 Xilinx ISE、QUARUSII、MATLAB 及 C++ 等, 这些软件都有其各自的特点. Xilinx ISE 和 QUARUSII 是 FPGA 的开发软件, 编译简单; MATLAB 在矩阵运算方面有巨大的能力; 而 C++ 程序运行速度快, 能快速运行演化算法.

将演化算法融入硬件设计之中, 如果直接在 Xilinx ISE 和 QUARUS II 工程中实现演化算法, 演化成功后形成的配置文件可以直接下载, 如果在 MATLAB 或 C++ 等辅助软件中实现演化算法, 演化出的结果需要转换成配置文件数据.

另外,在对 FPGA 进行故障测试的时候,还可以采用 Jbits API 接口技术,此种方法只能应用于 Xilinx 公司生产的 FPGA 的 Virtex-II 系列芯片。Jbits 可以控制未留配置数据的产生,而对应的 API 能够构建在 Virtex-II 系列芯片内部执行的数字电路设计和参数核。同时其也能够充当基础来构造传统电路的布局布线等一些精细的规划^[3]。

Jbits 实现对 FPGA 配置信息读写操作如图 5 所示。Jbits 能够对 Virtex-II 系列芯片所有的可设置参数进行编程存取,不仅能够操作位流文件,还能够对配置信息进行回读,能够很直接地修改配置数据文件实现系统功能的重构。



图 5 Jbits 实现对 FPGA 配置信息读写操作示意图

4.3 演化字典查询机制

现有演化方案大多属于离线演化,不具有时效性,耗时很长。在故障字典法优点的基础上,提出演化字典理论^[9]。

故障字典法是模拟电路故障诊断中具有实用价值的方法,其需要事先确定所要诊断的故障集,然后求故障及对应的响应,对响应进行处理得到故障特征,从而构成一部故障——特征字典^[10]。在诊断的时候就相当于一个查字典的过程。

在演化系统中,如果能提前演化出每一种故障多对应的演化策略,形成一部演化策略字典,演化过程就是一个查字典的过程。事先将可能出现的各种故障进行统计,在对每一种故障通过演化算法制定出演化策略,他们之间形成映射关系。再将这种映射关系,存入存储器,在故障自修复过程中将没有演化过程,耗时只存在从存储器进行演化策略查找,这将为实现故障的快速修复节约大量的时间。

如图 6 所示,演化字典遵从一定的查询机制。首先需要对 FPGA 进行故障诊断,将故障信息传递给 CPU, CPU 在接收到反馈回来的故障信息后进行演化字典查询,查询到演化策略后,通过 USB 下载线将目标演化策略配置数据下载到 FPGA,此时自修复成功。但是针对某些故障信息可能存在没有对应的演化策略,此时就会发生自修复不成功的现象。

5 结束语

提高电子装备电子系统可靠性非常重要,除了容错技术能够提高电子装备可靠性外, EHW 技术不失为一种有效的方法。

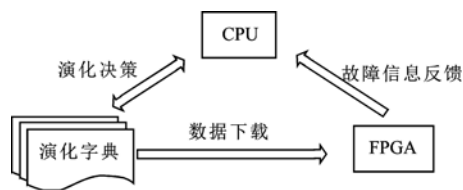


图 6 演化字典查询机制

基于 EHW 的故障自修复技术,避免了对 FPGA 内部逻辑资源进行精确的故障定位。在充分分析含 FPGA 芯片的电子系统故障模式的基础上,使故障诊断和 EHW 相融合,对实现故障自修复的系统模式进行了设计。

将进化算法与数字电路故障诊断有效的结合在一起,开辟了数字电路故障诊断新途径,在军事、航空、航天领域等领域有重要的用途,硬件演化技术必然受到了极大的关注。

参考文献:

- [1] 张峻宾,蔡金燕,李丹阳,等. 三进制编码实现硬件演化方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(3): 1-4.
- [2] 张强,周军,于晓洲. 一种可局部动态实时重构的演化硬件平台[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(5): 761-765.
- [3] 徐阳. 硬件演化理论、方法与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
- [4] 苏玮. 电路故障诊断软件的优化设计与实现[J]. 微计算机信息, 2007, 23(5): 222-224.
- [5] 熊仕猛,沈苏彬,李莉. 边界扫描技术的功能测试应用[J]. 微计算机信息, 2011, 27(10): 73-75.
- [6] 李炳新,汪波,张辉. 用于可重构计算的 FPGA 开发平台的研究[J]. 微电子学与计算机, 2011, 27(11): 139-142.
- [7] 姚睿,王友仁,于盛林,等. 基于进化硬件的自修复 TMR 系统设计及其可靠性分析[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(8): 72-76.
- [8] 汤琦,蒋军敏. Xilinx FPGA 高级设计及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [9] 胡庚,王红,杨士元. 非线性模拟电路的故障诊断方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(1): 1-5.
- [10] 叶笠,王厚军,叶芑,等. 容差模拟电路诊断中故障隔离的几何方法[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 53-57.

作者简介:

张峻宾 男, (1987—), 硕士研究生. 研究方向为电子系统性能检测与故障诊断、硬件演化、故障自修复。

蔡金燕 女, (1961—), 教授, 博士生导师. 研究方向为检测理论、故障诊断、可靠性共性技术。