

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.06.024

一种可重构区域内替代的冷三备份 FPGA 功能模块自修复方法

黄莉莉,张岩,王涛,袁霄亮

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

摘要:以宇宙空间强辐射环境下商用 SRAM 型 FPGA 易受到单粒子效应影响而产生各种故障为研究背景,针对可重构区域间替代的自修复方式导致系统功能模块硬件资源利用率低的问题,提出一种可重构区域内替代的自修复方式。为了验证上述自修复方法能够提高系统的硬件资源利用率,配合此方法设计一种冷三备份 DPR_O/TMR 自修复结构,此结构能够进一步减少系统的资源消耗。同时给出一种软硬故障分类处理的 FPGA 系统自修复策略。通过理论分析和实验,证明了该自修复方式的可行性和高效性,为 SRAM 型 FPGA 芯片的设计开发人员提供了一种通用性的 FPGA 系统自修复设计方法。

关键词: FPGA;单粒子效应;动态部分重构;自修复;功能模块

中图分类号: V443;V520.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)06-0096-06

A Self-healing Method for Cold Triple-backup FPGA Functional Modules with Substitution in Reconfigurable Regions

HUANG Lili, ZHANG Zhai, WANG Tao, YUAN Xiaoliang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the research background that commercial SRAM FPGA is vulnerable to various faults caused by single event effect in the strong radiation environment of space, and with the aim at low utilization of hardware resources of system functional modules caused by the self repair mode of reconfigurable region substitution, a self repair mode of reconfigurable region substitution is proposed. In order to verify that the above self repair method can improve the utilization of hardware resources of the system, a cold three backup self repair structure is designed by this method, which can further reduce the resource consumption of the system. Meanwhile, a self repair strategy of FPGA system for soft and hard fault classification and processing is given. Theoretical analysis and experiments are conducted to prove the feasibility and efficiency of the self repair method, which provides a general self repair design method of FPGA system for the SRAM FPGA chip designers and developers.

Keywords: FPGA; single event effect; dynamic partial reconfiguration; self repair; function module

0 引言

宇宙强辐射环境下大量高能粒子受太阳活动的影响,引发单粒子效应。近几年,商用现货 FPGA 由于性能高、成本低、开发周期短且不受国外进口限制,被越来越多地应用于航天电子设备中^[1],与空间级或军用级的 FPGA 相比,商用 FPGA 的抗辐射能力较低,更容易发生瞬时故障和永久故障。瞬时故障由于并未对硬件电路造成损伤,可以通过重新上电或者系统复位等方式修复,因此称为软故障;永久故障则是物理损伤,无法通过重新上电等方法修复,因此又称为硬故障。不同于地面环境,空间航天器在轨运行时远程控制复杂,一旦发生故障,难以及时人工维修,因此研究高可靠的 FPGA 系统自修复设计方法是提高商用 SRAM 型 FPGA 系统可靠性的有效途径和发展方向。

目前,FPGA 功能模块故障自修复方法包括冗余技术、可重构技术和纠错码技术^[2-3]。动态可重构技术通常只能修复软故障,无法处理硬故障;冗余技术包括热备份冗余和冷备份冗余,热备份具有故障中断时间短、容错速度快的优点,但是由于所有备份模块均需同时工作,运行功耗大;而冷备份的备份模块上电无需立即运行,虽然自修复中断时间较之热备份长,但是随着时钟频率的提高,故障的中断时间会大大减小,同时冷备份冗余能够降低系统运行功耗;纠错码技术只能纠正有限位的错误。因此,考虑资源消耗、运行时的功耗以及修复的可靠性,通常将传统硬件冗余技术和动态部分重构技术相结合^[3-5],并且大多采用 FPGA 底层可重构区域间替代的冗余备份自修复方式^[6-8]。这种自修复方式通常存在多个可重构功能模块,当模块间存在信号交互时,自修复系统需要在信号交互的各备份子模块之间增加额外的辅助连线切换逻辑,

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(NS2018026);航空科学基金项目(20183352031);研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20190316;kfj20200319)

第一作者简介:黄莉莉(1996—),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为航空电子设备故障自修复。

通过辅助连线切换逻辑对不同的备份模块进行布线的选择。容错系统越复杂,辅助连线切换逻辑就越复杂,占用硬件资源面积也就越大,同时辅助连线切换逻辑也容易受到单粒子效应的影响发生故障,进而导致 FPGA 故障率增加的同时可靠性降低。

为了提高功能模块的资源利用率和可靠性,在对有信号交互的系统进行容错时,减少或去除自修复结构中的辅助连线切换逻辑,针对两个动态模块中通用的布线逻辑进行缩减并且进行固定,只需生成要进行替换的可重构模块,减少了大量冗余的辅助连线切换逻辑和配置信息的数量,降低了 FPGA 硬件资源消耗,提高了系统可靠性。

综上,本文面向空间强辐射环境下商用 SRAM 型 FPGA 系统可靠性不足的问题,针对可重构区域间替代的冷备份自修复结构导致功能模块硬件资源利用率低的问题,提出了一种可重构区域内替代的冷三备份 FPGA 功能模块自修复方式,通过使用相同功能的配置信息对功能模块内的不同区域进行重构修复。为了实现可重构区域内替换的自修复方式,设计了一种冷三备份的 DPR_O/TMR 自修复结构。相比其他现有的自修复结构,DPR_O/TMR 自修复结构能够进一步提高硬件利用率;同时为了保障可重构区域内替换的自修复方式的可靠性,利用冷三备份 DPR_O/TMR 自修复结构对软硬故障的处理进行分析,给出一种软硬故障分类处理的自修复策略,以提高不同软故障比例空间环境下的可重构区域内自修复方式的可靠性。通过理论分析和实验证明该自修复方式可行性和有效性,为 SRAM 型 FPGA 芯片的设计开发人员提供了一种通用

性的 FPGA 系统自修复设计方法。

1 自修复方式与结构

1.1 可重构区域内替换的自修复方式

由于 SRAM 型 FPGA 的可重构特性,因此在同一个物理区域内通过加载不同的配置信息可以实现不同的功能,所以也将可重构模块称为功能模块。

在对 FPGA 系统功能模块进行容错时,主流的冷备份自修复方法大多采用 FPGA 底层可重构区域间替代的自修复结构。这种方法在对有信号交互的功能模块进行容错时,需要在各子模块之间增加额外的辅助连线切换逻辑资源。

如图 1(a)所示,系统功能模块由存在信号交互的模块 A 和模块 B 共同实现,模块 A 和模块 B 通过重布线开关块相互通信。这里的重布线开关块即辅助连线切换逻辑,模块 A 和模块 B 分别位于可重构区域 RP_1 和 RP_2 内,可重构区域 RP_3 和 RP_4 分别用于修复模块 A 和模块 B,初始时空区域;图 1(b)中,当模块 A 发生故障后,重布线开关块迅速断开开关 k_1 ,切断模块 A 和模块 B 之间的连线;图 1(c)中,故障隔离后用模块 A 的配置信息动态重构区域 RP_3 并在重构完成后闭合开关块 k_3 ,建立可重构区域 RP_2 和 RP_3 之间的通信连接;如图 1(d)所示,用空配置信息动态重构区域 RP_1 ,屏蔽故障区域 RP_1 内的故障影响。

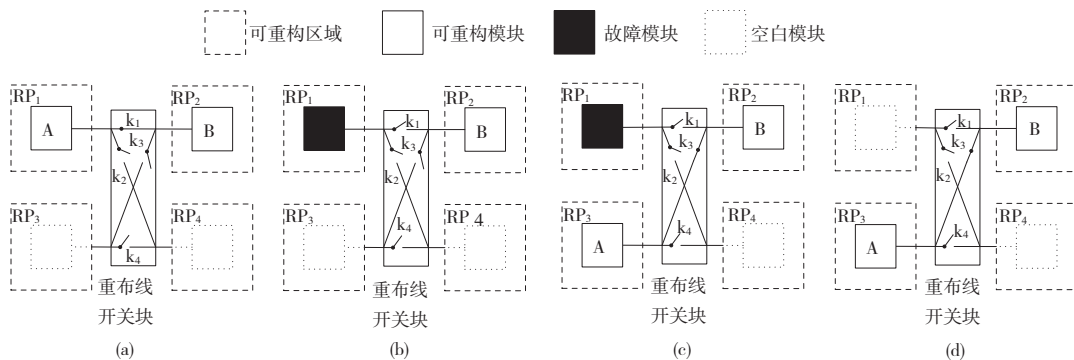


图 1 可重构区域间替代的冷备份自修复方法

这种方法的整个修复过程一共分为 4 步,分别是隔离故障—为替代区域配置功能—重建区域间通信连接—屏蔽故障区域。在对大规模信号交互的功能模块进行容错时,辅助连线切换逻辑会更加复杂,占用硬件资源面积也更大,进而导致 FPGA 的故障率增加可靠性降低。

本文针对有信号交互的功能模块,提出了一种可重构区域内替代的冷备份自修复方法。如图 2(a)所示,模块 A 和用于替代修复模块 A 的区域都位于可重构区域 RP_1 内,模块 A 处于 RP_1 的上半部分区域,下半部分为空白区域,此时“A 模块+空模块+连线 c_1 ”作为 RP_1 的一套配置信息;模块 B 同理,可重构区域 RP_1 和 RP_2 之间连线 c_0 固定。如图 2(b)所示,模块 A 发生了故障。图 2(c)中通过使用“空模块+A 模块+连线 c_3 ”配置信息动态重构区

域 RP_1 ,迅速同时完成功能替代、故障屏蔽和连线切换。本文采用的可重构区域内替代的冷备份自修复方法无需增加额外的重布线开关逻辑块,修复过程只需要 1 步完成,能够有效降低 FPGA 硬件资源消耗,提高系统可靠性。

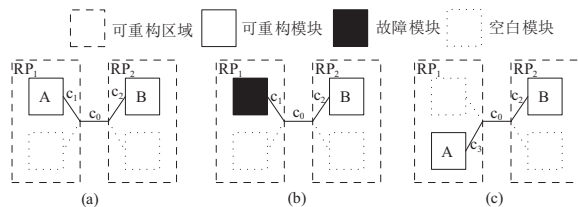


图 2 可重构区域内替代的冷备份自修复方法

1.2 DPR_O/TMR 冷三备份自修复结构

为了验证可重构区域内替换的自修复方式的可靠性,本文提出一种 DPR_O/TMR 冷三备份结构。

DPR_O/TMR 冷三备份功能模块自修复结构如图 3 中右侧虚线框内所示。同一功能模块 (FC_x) 中的功能分子 (FM_x) 实现相同逻辑功能但使用不同底层硬件资源,同一时刻每个功能模块 (FC_x) 只有一个功能分子 (FM_x) 工作,即图 3 中功能分子 FM01,其他两个功能分子 FM02 和 FM03 采用冷备份的方式,将其配置信息形式保存于外部配置存储器中。

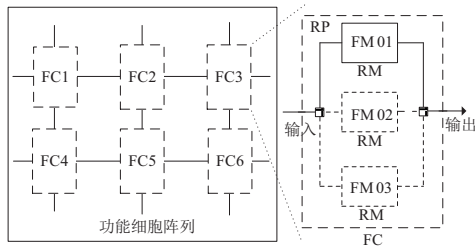


图 3 自修复系统功能模块

针对 DPR_O/TMR 冷三备份的自修复结构,其配置信息替换的方式如图 4 所示。M0、M1、M2 和 M3 分别为功能模块 (FC) 的四套配置信息,控制电路会在自修复系统检测出故障信号后,为功能模块 (FC) 重新加载配置信息完成故障容错。其中 M1、M2 和 M3 为实现相同逻辑功能

的配置信息,当分别加载 M1. bit、M2. bit 和 M3. bit 3 套配置信息时,功能模块中工作的功能分子分别为 FM01、FM02 和 FM03。而 M0 为黑盒配置信息,当加载 M0. bit 配置信息时,功能模块中没有工作的功能分子,实现对该功能模块进行逻辑功能屏蔽的效果。在同一时刻只有一套配置信息运行,另外的两份配置信息处于冷备份状态。

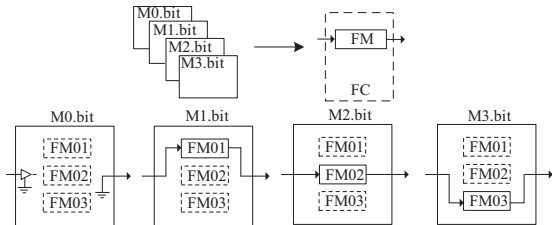


图 4 功能模块中的配置信息图

根据以上的自修复结构,本文采用软故障修复方法通过使用正在工作的功能分子配置重构功能细胞刷新修复故障。如图 5(a) 所示,初始功能细胞中工作的功能分子为 FM01,在图 5(b) 中 FM01 发生了软故障。因此,图 5(c) 中控制细胞通过使用 M1 配置信息重构功能细胞刷新修复了该软故障。

硬故障修复方法则通过更换功能分子配置重构功能细胞替代修复故障,当无法再修复时,通过加载黑盒配置屏蔽故障。如图 5(d) 所示,功能分子 FM01 发生了硬故障,图 5(e) 中控制细胞通过使用 M2 配置信息重构功能细胞替代修复了该硬故障。

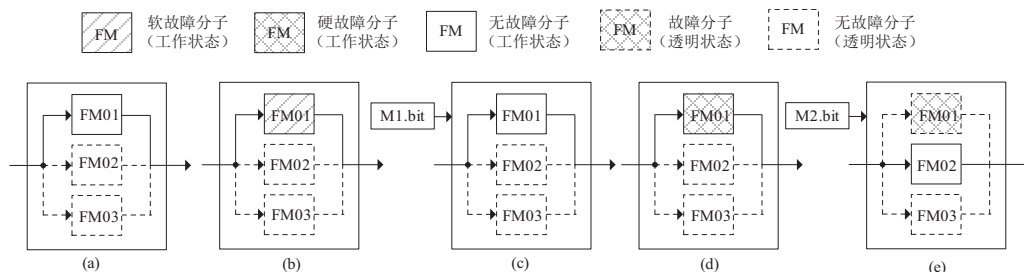


图 5 软/硬故障修复方法

2 物理实验设计及验证

2.1 物理实验设计

本节以 Zynq 系列 SoC 平台为例,采用 8 位流水线加法器作为功能模块,对本文提出的自修复方式和自修复结构进行实验设计和验证。

图 6 所示为 Xilinx Zynq 系列开发板。图中主要使用的硬件包括用于搭载自修复系统的 Zynq SoC 芯片、用于外部位流存储的 DDR3 芯片和 SD 卡(初始位流加载)、用于故障注入和观察各细胞状态的矩阵键盘、用于观察 ILA 监测信号的 JTAG 接口和用于位流加载调试的 UART 接口。物理实验中,自修复系统的重构时钟频率和 ILA 的工作频率为 100MHz,工作时钟频率和 ILA 监测时钟频率为 50MHz。

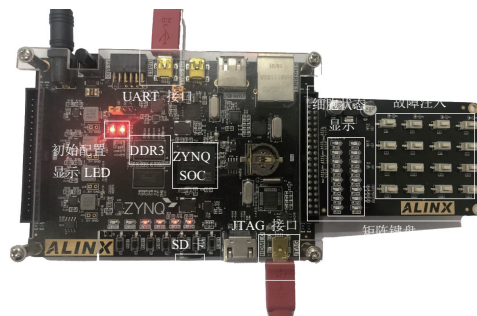


图 6 Xilinx Zynq 系列 SoC 开发板

2.2 软故障自修复实验验证

图 7 为软故障自修复过程,该观测窗口记录了重构修复起点附近的信号变化。

- 1) 在第 994 个观测点时,注入一个软故障。
- 2) 在第 1 000 个观测点时功能模块 FC3 发出自检检测信号;第 1 024 个观测点时,功能模块输出全为 0 的错误信号。
- 3) 第 1 008 个观测点时,功能模块检测到发生故障后采用 FM01 刷新修复该故障。
- 4) 第 1 068 个观测点时,开始进行传输配置位流,同时开始对重构过程计时。

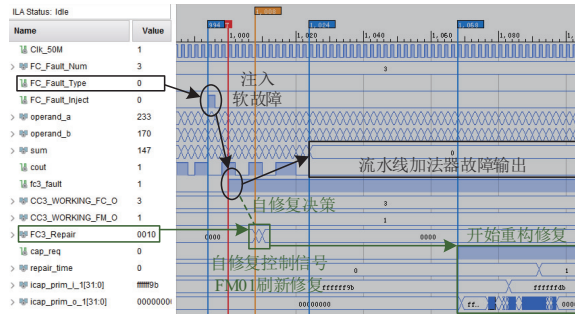


图 7 软故障自修复过程实现图

图 8 为软故障自修复完成时的监测结果,该观测窗口记录了重构修复终点附近的信号变化。

- ① 在第 1 000 个观测点时,ILA 捕获到 cap_req 信号下降沿,标志着重构修复过程完成,通过 repair_time 信号可以看出整个重构过程为 381 μs。
- ② 在第 1 019 个观测点时,故障被消除,软故障刷新修复完成。

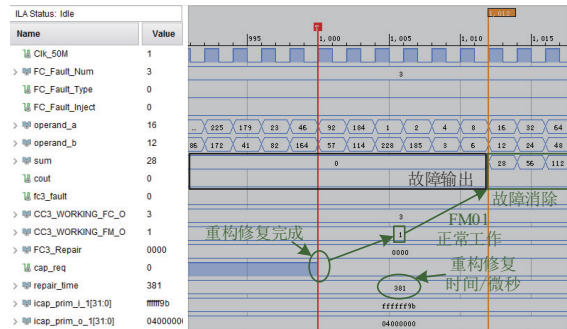


图 8 软故障自修复完成时的监测结果图

2.3 硬故障自修复实验验证

图 9 为硬故障自修复过程,该观测窗口记录了重构修复起点附近的信号变化。

- 1) 在第 939 个观测点时,系统完成了上一次故障自修复的执行操作。
- 2) 为了使该故障保持为一个硬故障,在第 996 个观测点时,系统根据检测到上一次自修复的完成信号,随即再次注入一个故障。
- 3) 在第 1 020 个观测点时 FC3 检测出该故障。控制电路根据 FTEF<SFET,判定该故障为硬故障并发出自修复控制信号。
- 4) 第 1 004 个观测点时,功能模块检测到发生故障并准备采用 FM02 替代修复该故障。

- 5) 第 1 062 个观测点时,开始传输配置位流,同时开始对重构过程计时。

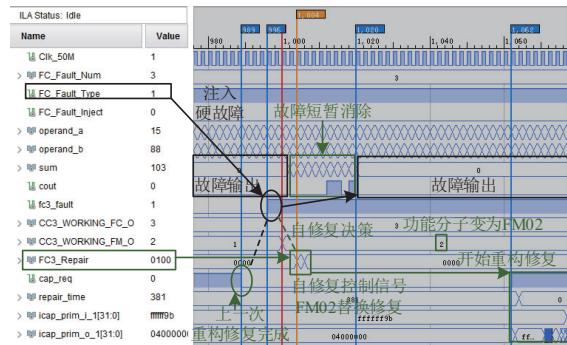


图 9 硬故障自修复过程实现图

图 10 为硬故障自修复完成时的监测结果,该观测窗口记录了重构修复终点附近的信号变化。

- ① 在第 1 000 个观测点时,ILA 捕获到 cap_req 信号下降沿,标志着重构修复过程完成,整个重构过程为 381 μs,传输配置位流 75 742 个字节。
- ② 在第 1 012 个观测点时,故障被消除,硬故障替代修复完成。

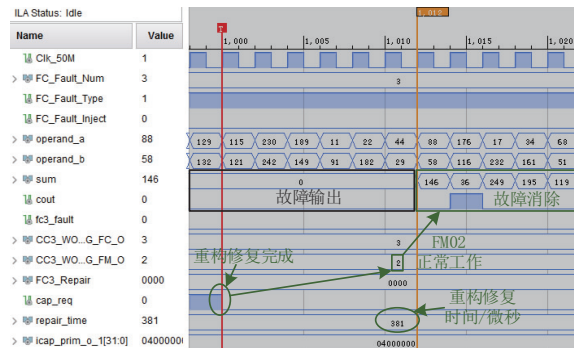


图 10 硬故障自修复完成时的监测结果图

3 性能分析

本节从系统可靠性、硬件资源消耗、自修复时间消耗三个方面对可重构区域内替换的自修复方式进行性能对比分析。

3.1 可靠性分析

可靠性是一种评估系统性能好坏的重要指标,是指系统在规定条件和规定时间内完成预定功能的能力^[9]。评价系统可靠性的定量测度称为可靠度,可靠度指系统在 t_0 时刻正常工作的条件下,在时间区间 $[t_0, t]$ 内能正常工作的概率,常用 $R(t)$ 表示。若一个模块在正常生命期内的失效率为常数 λ ,则它的可靠度为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

假设该模块在 t 时刻正常工作,则其在 $(t+\Delta t)$ 时刻的可靠度为 $1-e^{-\lambda \Delta t}$,当 Δt 取值很小时,该公式可以化简为 $\lambda \Delta t$ ^[10]。

对于一个可维修的系统,由于其修复时间相对于正常

工作时间很短,因此系统的平均寿命可以用平均无故障间隔时间 M_{TBF} 来表示,即可靠度 $R(t)$ 的均值,表达式如下:

$$M_{TBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2)$$

为了验证本文提出的可重构区域内替换自修复设计方法的可靠性,以不同的自修复结构对其可靠性进行分析。

目前,针对结合动态部分重构的三备份自修复结构包括使用三个工作区域的热三备份自修复结构、使用两个工作区域和一个空闲区域的冷三备份结构,分别记为 DPR_TMR、DPR_D/TMR 以及本文提出的采用一个工作区域和两个空闲区域结构的 DPR_O/TMR。三种自修复结构如图 11 所示,可以看出 DPR_O/TMR 可以修复两次故障,系统仍然能正常工作,而 DPR_D/TMR 和 DPR_TMR 只能修复一次故障,当第二次故障时系统无法判断出正确的结果。显然,在不考虑容错模块的差异性时,DPR_O/TMR 的容错能力更强。

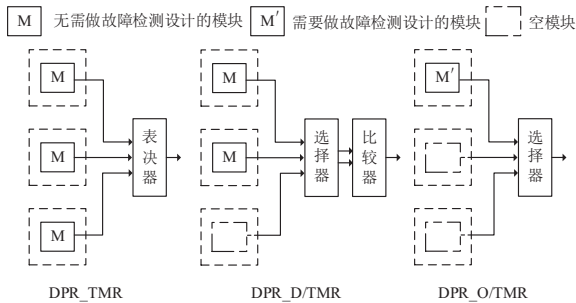


图 11 基于动态部分重构的三备份自修复结构图

由于 DPR_O/TMR 的每一个工作模块相对于 DPR_D/TMR 和 DPR_TMR 两种方法需要自身具备故障自检测设计,因此增加了一定的硬件资源,而 DPR_D/TMR 和 DPR_TMR 可以通过表决器或比较器实现故障检测,无需在每个工作模块中增加故障自检测设计。

如图 12 所示,为了能够合理比较三种三备份自修复结构的可靠性,将 DPR_D/TMR 和 DPR_TMR 也采用相同的具有自检测设计的模块作为容错对象,同时使用选择器取代两种结构中的表决器和比较器,使三种自修复结构具有相同的硬件资源消耗,并分析其可靠性。

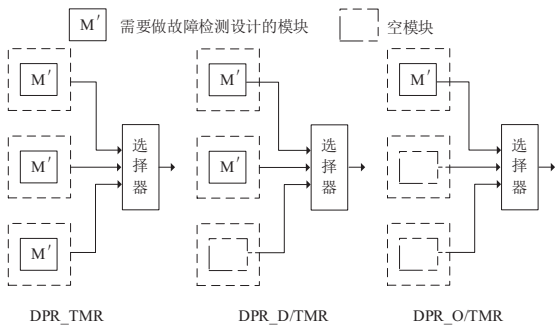


图 12 等效后的三备份自修复结构图

考虑到不同的复杂环境下,软故障和硬故障发生概率

有很大差别,因此设置软故障比例参数 S (指在特定环境下,系统中发生的故障为软故障的比例)。由于 DPR 刷新方法能够有效胜任全部软故障环境,因此几种自修复结构在全部软故障环境下的可靠性相同。根据软故障比例参数 S ,可以用 λS 表示错误率中可以通过重构修复的软故障错误率, $\lambda(1-S)$ 表示失效率中不可以通过重配置修复的硬故障错误率。

基于马尔可夫模型^[11],可以分别计算出本文功能模块的 DPR_O/TMR 结构与 DPR_D/TMR、DPR_TMR 自修复结构及单模动态部分刷新结构的基于软故障比例参数 S 的可靠度函数:

$$\begin{cases} R_{DPR_O/TMR}(t) = e^{-2\lambda(1-S)t} + \lambda(1-S)te^{-2\lambda(1-S)t} + \\ \frac{1}{2}\lambda^2(1-S)^2t^2e^{-\lambda(1-S)t} \\ R_{DPR_D/TMR}(t) = -3e^{-2\lambda(1-S)t} + 4e^{-2\lambda(1-S)t} - 2\lambda(1-S)te^{-\lambda(1-S)t} \\ R_{DPR_TMR}(t) = e^{-3\lambda(1-S)t} - 3e^{-2\lambda(1-S)t} + 3e^{-\lambda(1-S)t} \\ R_{DPR}(t) = e^{-\lambda(1-S)t} \end{cases} \quad (3)$$

根据以上可靠度函数,以失效率 $\lambda = 1 \times 10^{-6} h$ 、系统运行总时间 $t_{max} = 10^7 h$ 、软故障比例参数 $S \in [0, 1]$ 为例,绘制如图 13 所示的可靠度 $R(t)$ 随软故障比例 S 变化三维对比曲面图(本图为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。3 种自修复结构的可靠度 $R(t)$ 都随 S 增大而提升,且 DPR_O/TMR 结构的可靠度高于 DPR_D/TMR 和 DPR_TMR, DPR_D/TMR 的可靠度略高于 DPR_TMR。

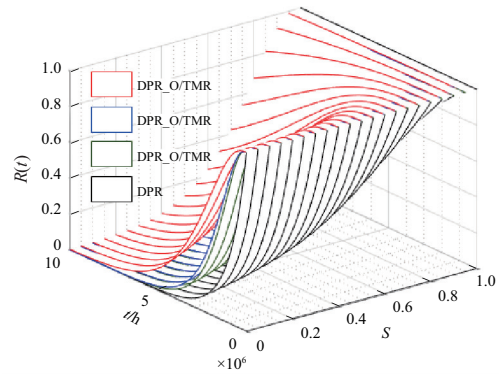
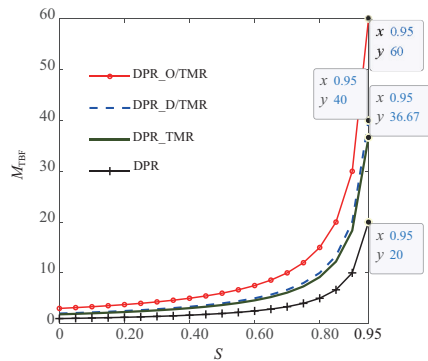


图 13 $R(t)$ 随 S 变化三维对比曲面图

进一步分析不同软故障比例 S 对系统可靠性 M_{TBF} 的影响。由于 $S=1$ 时,3 种自修复结构的可靠性都接近无穷大,因此分别计算出 $S \in [0, 0.95]$ 时 3 种自修复结构的 M_{TBF} 。如图 14 所示,3 种自修复结构的 M_{TBF} 都随 S 增大而提升。相同 S 时,DPR_O/TMR 的可靠性 M_{TBF} 始终最高,DPR_D/TMR 可靠性 M_{TBF} 略高于 DPR_TMR。当 $S = 0.95$ 时,DPR_O/TMR 系统的可靠性是 DPR_D/TMR 的 1.5 倍,是 DPR_TMR 的 1.64 倍,是动态部分刷新的 3 倍。

综上所述,与现有设计方法相比,DPR_O/TMR 的结构更好地适应可重构区域内替换的自修复方式,与现有的方法相比,使可重构区域内替换的自修复方式可靠性相对达到最大。

图 14 M_{TBF} 随 S 变化曲线图

3.2 硬件消耗分析

以 8 位流水线加法器为例,对采用可重构区域内和可重构区域间替代自修复方法的功能模块进行硬件资源消耗对比。

如表 1 所示,采用可重构区域间替代方法的冷三备份 (DPR_O/TMR) 功能模块自修复结构资源消耗是原功能模块的 6.12 倍,而采用可重构区域内替代方法的 DPR_O/TMR 自修复结构资源消耗是原功能模块的 5.82 倍,采用可重构区域内替代方法较可重构区域间替代方法的硬件资源减少了 7.48%。由此可见采用可重构区域内替换修复的 DPR_O/TMR 方法较之可重构区域间替换修复的 DPR_O/TMR 方法能够有效减少硬件资源消耗。

表 1 不同冷备份替代修复方法的硬件资源消耗

硬件资源	冷备份替代修复方法	加入自检测设计的功能模块	DPR_O/TMR 自修复结构
逻辑资源	可重构区域间替代	33	107
	可重构区域内替代		99

3.3 时间消耗分析

设系统的工作时钟周期为 T_{clk} , 重构时钟周期为 T_{reclk} , 配置位流的大小为 N_{bit} (字节), 则自修复系统功能模块的故障修复时间为 $5T_{clk} + 58T_{reclk} + (N_{bit}/200) \mu s$, 本文物理实验中取 $T_{clk} = 50 \text{ MHz}$, $T_{reclk} = 100 \text{ MHz}$, 位流的配置传输时间约为 $(N_{bit}/200) \mu s$ 。若采用可重构区域间替换的自修复方式所需要的部分配置位流大小 $N_{bit} = 75\ 742$ 个字节, 计算出故障修复时间约为 $379.39 \mu s$; 若采用全局可重构替换的自修复方式所需要的配置位流大小为 $N_{bit} = 1\ 049\ 741$ 个字节, 计算出故障修复时间约为 $5\ 249.41 \mu s$; 而采用本文可重构区域内替换的冷备份自修复方式需要的部分配置位流大小 $N_{bit} = 37\ 871$ 个字节, 可以计算出故障修复时间约为 $190.035 \mu s$ 。因此采用本文方式较可重构区域间替换的自修复方式时间消耗减少了 1 倍; 较全局可重构的自修复方式时间消耗减少了 26.6 倍。

在空天环境下,一旦系统发生故障,需要及时对系统进行修复,使其恢复正常运行。比如当卫星处于变轨运动时,若系统发生故障不能及时恢复,会对整个系统产生不可预估的后果。综上分析,针对同样大小粒度的功能模

块,本文提出的模块自修复方式具有较小的自修复时间消耗,减少系统自修复的时间,提高系统的可靠性,给空天环境下实时运行的航天设备提供自修复设计的通用性参考。

4 结语

1) 提出了一种可重构区域内替换的自修复方式,设计了一种 DPR_O/TMR 自修复结构,这种自修复结构能够更好地适应可重构区域内替换的自修复方式,并且能够进一步减少资源的消耗;

2) 为了保障可重构区域内替换的自修复方式的可靠性,研究了一种软硬故障分类处理的 FPGA 系统自修复策略,以应对空天环境下不同比例的软硬故障;

3) 从系统可靠性、时间消耗、硬件资源消耗三个方面进行了性能分析,说明了本文可重构区域内替代的冷三备份 FPGA 功能模块自修复方法的可行性与高效性。

参考文献:

- [1] SIEGLE F, VLADIMIROVA T, ILSTAD J, et al. Mitigation of radiation effects in SRAM-based FPGAs for space applications [J]. ACM Computing Surveys, 2015, 47(2): 37.
- [2] CETIN E, DIESEL O, GONG L K, et al. Towards bounded error recovery time in FPGA-based TMR circuits using dynamic partial reconfiguration [C]//2013 23rd International Conference on Field programmable Logic and Applications. Porto, Portugal: IEEE, 2013: 1-4.
- [3] PRADEEP C, EAPEN M E, JOBY P P, et al. Online placement and scheduling algorithm for reconfigurable cells in self-repairable field-programmable gate array systems [J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 67: 836-850.
- [4] 张岩, 王友仁. 基于可靠性优化的芯片自愈型硬件细胞阵列布局方法 [J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3392-3402.
- [5] VAVOURAS M, BOUGANIS C S. Area-driven partial reconfiguration for SEU mitigation on SRAM-based FPGAs [C]//2016 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig). Cancun, Mexico: IEEE, 2016: 1-6.
- [6] 张岩, 刘燕, 黄莉莉. 基于冷备份多模冗余结构的 BRAM 自修复方法 [J]. 航空学报, 2021, 42(7): 324676.
- [7] 王烈, 许晓洁, 陈坚. 基于 EAPR 的局部动态自重构系统的实现 [J]. 电子技术应用, 2013, 39(12): 31-33, 40.
- [8] 王今雨, 伍卫国, 秦朝楠, 等. UPRFloor: 一种动态可重构 FPGA 建模方法与布局策略 [J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2862-2869.
- [9] PAN G, SHANG C X, LIANG Y Y, et al. Analysis of interval-valued reliability of multi-state system in consideration of epistemic uncertainty [M]//Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing. Cham: Springer International Publishing, 2016: 69-80.
- [10] STOTT E, CHEUNG P, SEDCOLE P. Fault tolerance and reliability in field-programmable gate arrays [J]. IET Computers & Digital Techniques, 2010, 4(3): 196-210.
- [11] PARASHAR B, TANEJA G. Reliability and profit evaluation of a PLC hot standby system based on a master-slave concept and two types of repair facilities [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2007, 56(3): 534-539.

收稿日期: 2021-07-05