

嵌入式系统门级在线自修复技术研究

满梦华^a, 原 亮^b, 巨政权^a, 解双建^b, 褚 杰^a

(军械工程学院 a. 静电与电磁防护研究所; b. 计算机工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 为保证复杂电磁环境下嵌入式系统的安全运行, 提出一种通用嵌入式系统在线故障自修复模型。基于 ARM 处理器和商业 FPGA 芯片实现原型试验系统, 借鉴生物系统在遭受一定损伤时能自行康复的特点, 结合仿生硬件领域中的内进化试验方法, 在原型系统上设计重配置执行单元的冗余拓扑结构和自律控制单元的演化修复算法。利用马尔可夫模型评价系统的可靠性与稳态可用度。结果表明, 在随机电磁损伤事件频繁发生并导致电路功能故障时, 该系统能保持较高的可用度和安全性。

关键词: 嵌入式系统; 自修复; 电磁仿生; 马尔可夫模型; 仿生硬件

Research on Gate-level Online Self-repairing Technology for Embedded System

MAN Meng-hua^a, YUAN Liang^b, JU Zheng-quan^a, XIE Shuang-jian^b, CHU Jie^a

(a. Electrostatic & Electromagnetic Protection Institute; b. Department of Computer Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

【Abstract】 The reliability of embedded system has become an integral part of the designing process, especially for those systems applied in the complex electromagnetic environment. In this paper, the online self-repairing model based on general embedded systems is proposed. The prototype system is realized with the ARM processor and commercial FPGA chip. Based on the self-healing characteristic of injured biological systems and the experiment methods of intrinsic Bio-inspired Hardware(BHW), the reconfigured executing unit and self-discipline controlling unit are implemented. The redundant gate array is in each reconfigurable executing unit, while the self-discipline controlling unit implements the genetic algorithm for self-repairing. Markov model is used to analyze the steady-state availability of the prototype. The result improves that it can keep higher available degree and security when the damaging event in the complex electromagnetic environment happened frequently.

【Key words】 embedded system; self-repairing; electromagnetic bionics; Markov model; Bio-inspired Hardware(BHW)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.19.003

1 概述

嵌入式系统以其高效率、低功耗和高可靠性的特点^[1], 已经广泛应用于各个领域。物联网作为信息领域又一次重大发展和变革机遇而迅速兴起^[2-3], 使得嵌入式信息处理终端需要更为普遍地运用于实时变化外界环境, 并进行更加可靠的信息采集、获取、交互、共享、决策和控制^[3]。

与此同时, 电磁干扰和损伤作为嵌入式系统的主要危害源正日趋复杂^[4], 除雷电、静电等自然危害源之外, 还包括通信、雷达、无线识别等射频干扰, 甚至一些人为电磁危害源, 这使得应用于通用嵌入式系统的传统电磁防护和抗扰方式的不足正日渐突出。文献[5]提出了电磁仿生的思想, 借助优良的生物特性和生物电磁效应, 以及传统的容错、抗扰和防护方法, 利用仿生学的技术手段建立仿生模型, 以满足电子系统在不同层面上的多种安全运行要求, 提高其综合生存能力。

鉴于此, 本文分类讨论了仿生硬件领域中各种内进化方法的技术特点, 提出并实现一种应用于通用嵌入式平台的在线自修复模型, 在原型系统上利用演化修复的方法提高其环境自适应和故障自修复的能力。

2 内进化技术研究动态

内进化技术研究属于仿生硬件领域中应用研究的重要方向^[6], 随着内进化技术的快速发展, 国内外学者已经提出并实现了多种类型的硬件体系结构、集成电路芯片和试验平台,

主要归纳为以下 3 类技术途径:

(1) 商业芯片位流级重配技术

此类方法的技术核心是利用 FPGA 厂商所提供的位流级局部重配置的功能和 API 函数予以完成。文献[7]提出了在线自适应系统, 利用 PC 和 FPCA 芯片 XILINX Virtex-II Pro(XC2VP20)搭建实验环境。FPGA 母板通过 PCI 插槽与 PC 相连, PC 端的演化程序通过 SDK 提供的接口函数(C 语言描述)与芯片进行交互, 实现在线演化的完整过程。文献[8-9]提出了在线进化修复平台, 由 PC 机和 XILINX Virtex FPGA 协处理环境构成。通过 PC 机执行进化修复算法, 利用基于 Java 的应用程序接口 JBits 操作 FPGA 的配置位流, 从而实现 FPGA 内电路功能的局部动态重构, 达到修复故障模块的目的。

(2) 商业芯片虚拟重配置技术

此类方法的技术核心是利用硬件编程语言在商用 FPGA 内设计一种虚拟重配置电路。文献[10]利用模型仿真的方法在通用 FPGA 结构上设计了虚拟重配置电路(Virtual Reconfigurable Circuits, VRC), 并使用故障注入的方法验证了该模型的容错性能和函数级故障自修复的功能。文献[11]在

作者简介: 满梦华(1984—), 男, 博士研究生, 主研方向: 电磁防护仿生, 智能故障检测与诊断, 容错技术; 原 亮, 教授; 巨政权, 博士研究生; 解双建, 硕士研究生; 褚 杰, 讲师

收稿日期: 2011-03-28 **E-mail:** manmenghua@hotmail.com

Xilinx 的 xcv2000E FPGA 上利用 VHDL 语言实现一种虚拟重配置结构(Virtual Reconfigurable Architecture, VRA), 并应用于实际问题字符识别与图像滤波。

(3) 专用芯片位流级重配技术

此类方法的技术核心是针对可重配置的特点定制一种可编程控制集成电路芯片。文献[12]所述的 POEtic 项目受个体发育学说和后天渐成学说的启发, 设计实现一种逻辑计算单元 ECell, 并利用高速串行通讯总线将大量 ECell 连接而成 EStack, 从而实现大规模可编程逻辑单元网。文献[13-14]采用 0.13 μm 工艺设计实现了一种 PowerPC405 软核+FPGA 的可重构芯片 FDP-III。

3 自修复通用嵌入式平台设计

基于结构自组织、环境自适应、故障自修复的生物自律三特性和笛卡尔遗传编程(Cartesian Genetic Programming, CGP)的思想, 本文提出一种具有强容错和自修复功能的嵌入式系统内进化结构模型, 并利用 ARM9 处理器和商业 FPGA 芯片完成原型系统的设计实现, 如图 1 所示。

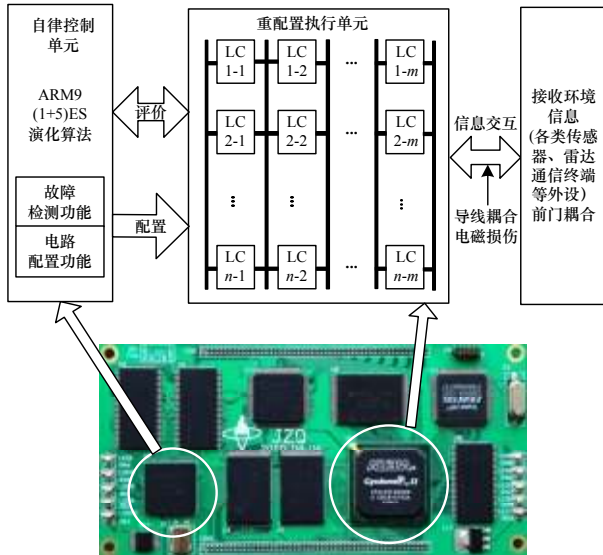


图 1 嵌入式内进化试验系统

本文模型包括自律控制单元和重配置执行单元。自律单元的主要功能为智能故障检测、演化生成并下载配置信息到可重配置单元, 使其执行系统既定逻辑运算任务。重配置单元的主要功能为直接与系统外界进行信息交互并完成系统所安排的逻辑运算任务。

3.1 自律控制单元

自律控制单元主要由 Samsung 的 S3C2440 嵌入式处理器结合遗传修复算法构成。利用遗传修复算法的评价函数检测

重配置单元电路功能的故障。当检测到故障时, 遗传算法变异染色体的信息以改变重配置执行单元内电路的拓扑结构, 并检测电路功能是否恢复。循环执行此过程直到演化出一组既能隔离受损逻辑单元, 又能完成系统功能的染色体配置信息。从而使系统功能的执行单元具有了故障自修复的功能。

遗传修复算法选用基于精英保留的 $(1+\lambda)$ ES 遗传策略^[15], 其中影响此算法性能的主要参数有染色体种群规模、映射电路结构规模和变异率^[16-18]。文献[16]以 MIMO 数字电路作为研究对象, 实验分析了映射电路的不同结构对演化算法的影响, 结果表明方形冗余阵列结构比线形冗余结构更适合于数字电路演化设计。文献[17-18]针对不同复杂度的演化对象深入分析了变异率参数对算法效率、冗余资源利用率和演化代数数的影响, 指出相对较高的变异率(0.3%~0.5%)可导致算法效率降低, 演化代数增加, 但结果的资源利用率较高。相对较低的变异率(0.02%~0.04%)可提高算法的效率, 减小成功演化所需的代数, 但结果为资源利用率不高的局部最优解。本文遗传修复算法选取的典型参数如表 1 所示。

表 1 算法参数

参数名称	取值
溢出代数	100 000
种群规模	5
精英保留	是
基因变异率/(%)	0.05
冗余门行数	10
冗余门列数	8
电路互连度	1

遗传修复算法的主要步骤为:

- (1) 对所有个体的染色体初始化, 随机生成一个规模为 5 的种群;
- (2) 对种群中所有个体进行适应度评估;
- (3) 从父代个体和子代种群中选择出适应度最高的个体作为新的父代个体;
- (4) 判断父代个体是否能完成预定功能;
- (5) 如果不能完成, 则将父代个体变异 5 次以产生新的子代种群, 并转步骤(2);
- (6) 如果能完成, 则修复成功。

3.2 重配置执行单元

重配置执行单元主要由可编程逻辑计算节点(Computing Node, LC)和内部互连网络构成, 并按阵列结构的形式组成一个冗余电路模型, 如图 2 所示。其中, 每个计算节点表示一个计算函数, 互连网络控制函数间的数据流向, 则整个可重配置执行单元构成一个可以完成系统既定逻辑计算功能的数字电路。

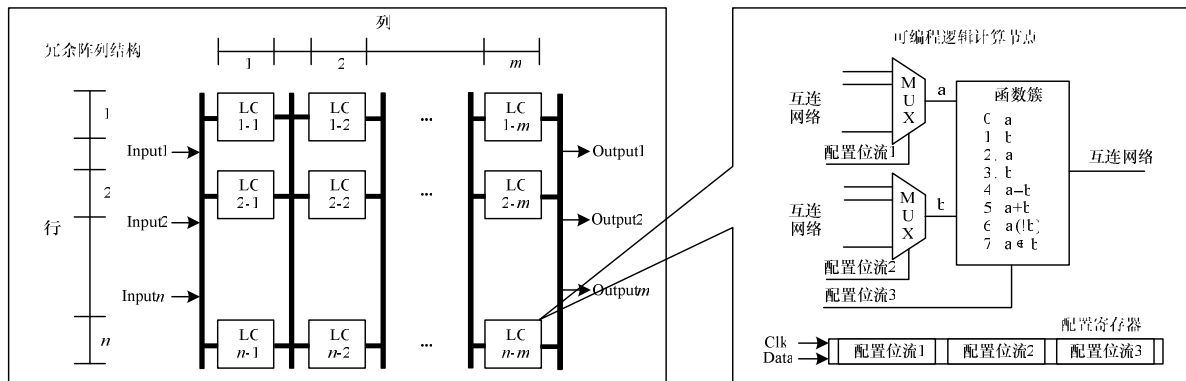


图 2 重配置执行单元结构

可编程逻辑计算节点包括计算函数簇、输入输出多路开关和配置寄存器。计算函数簇包括多种类型的逻辑运算函数, 多路开关控制内部互连网络与计算函数簇间的连接, 配置寄存器存储配置信息, 并按配置信息控制多路开关和计算函数簇的选择。内部互连网络控制全部计算单元间的数据流。

3.3 染色体编码设计

染色体编码作为载体传递演化修复算法的配置信息, 它控制着重配置执行单元中计算节点的逻辑功能和内部互连网络的连接情况, 具有承上启下功能。因此, 对其编码准确性和高效性的需求十分突出。

染色体的编码结构分2层设计——染色体级编码和基因级编码, 如图3所示。

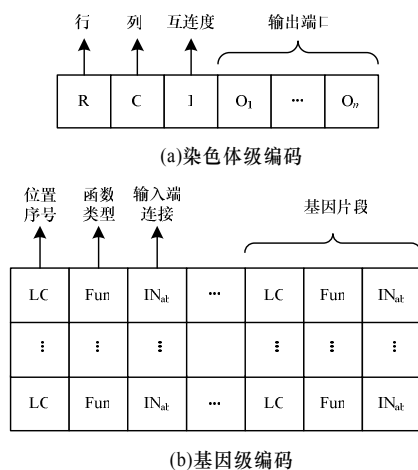


图3 染色体编码

染色体级编码存储重配置执行单元的整体信息, 包括可编程逻辑计算节点矩阵的列数、行数、内部互连网络的互连度, 以及电路的输出端口。其中, 最后一列计算单元的输出作为电路的可选输出端口; 基因级编码存储着具体电路的实现细节, 包括所有计算节点的逻辑功能和连接情况。按图3所设计的阵列结构, 将所有基因片段以二维数组的形式组织起来存储遗传信息。其中, 每个基因片段记录一个可编程逻辑计算节点的所有信息, 包括位置序号、函数类型和输入端连接位置。

4 基于马尔可夫模型的可靠性评价

嵌入式内进化试验系统的马尔可夫状态转移如图4所示。0表示正常工作状态; 1表示冗余节点故障状态; 2表示工作节点故障状态; λ_1 为引起部分冗余节点损伤的电磁损伤事件发生的概率; λ_2 为引起工作节点损伤的电磁损伤事件发生的概率; μ 为修复率。系统的可用状态集为 $W = \{0, 1\}$, 不可用状态集为 $F = \{2\}$ 。

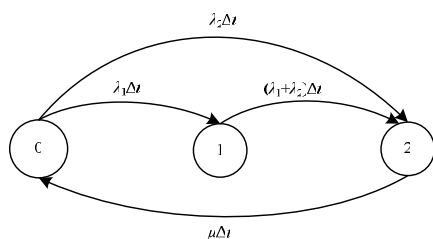


图4 模型状态转移图

根据以上状态转移图列出其马尔可夫过程的状态转移矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ 0 & -(\lambda_1 + \lambda_2) & (\lambda_1 + \lambda_2) \\ \mu & 0 & -\mu \end{bmatrix}$$

系统的稳态可用度为: $A = \sum_{i \in W} \pi_i$ 。其中, π_i 为当 $t \rightarrow \infty$ 时系统处于状态 i 的概率, 满足线性方程组:

$$\begin{cases} (\pi_0, \pi_1, \pi_2)P = (0, 0, 0) \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 = 1 \end{cases}$$

解得系统的稳态可靠度为:

$$A = \pi_0 + \pi_1 = [(2\lambda_1 + \lambda_2) \cdot \mu] / [(\lambda_1 + \lambda_2)^2 + \mu(2\lambda_1 + \lambda_2)]$$

设定典型值修复率 $\mu = 0.8$, 稳态可用度 A 随引发不同类型故障的电磁损伤事件发生率 λ_1, λ_2 的变化趋势如图5所示。

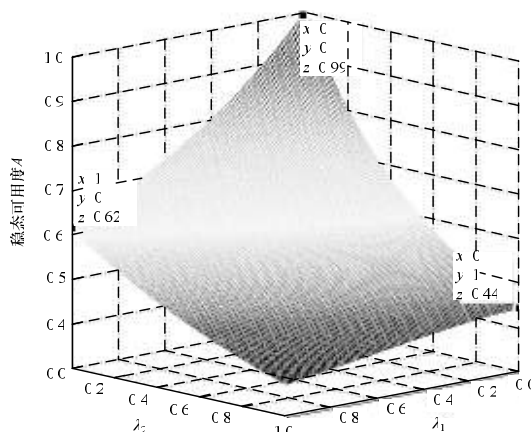


图5 稳态可用度函数

可见, 该函数图像的特点为:

- (1) 当 λ_1 趋近于 0 且 λ_2 趋近于 0 时, A 快速趋近于 1;
- (2) 当 λ_1 趋近于 1 或 λ_2 趋近于 1 时, A 一直保持高于 0.4;
- (3) A 关于自变量 λ_2 的偏导数大于关于自变量 λ_1 的偏导数, 即 A 对于 λ_2 的变化更敏感。

5 结束语

本文研究复杂电磁环境下嵌入式信息处理终端可靠性问题, 利用生物系统在遭受一定的损伤时能够自修复的特点, 将内进化技术与嵌入式系统相结合, 基于 ARM 处理器和商业 FPGA 芯片设计并实现了一种具有故障自修复功能的嵌入式内进化试验平台, 并利用马尔可夫模型评价了该平台的可靠性与稳态可用性。分析结果表明: (1) 当电磁损伤事件的时间分布离散度较大时, 系统具有较高的可靠度; 由于系统具有故障自修复功能, 因此当电磁损伤事件频繁发生并导致电路故障时, 系统仍能保持一定的可靠度和安全度。(2) 自律控制单元利用遗传算法实现修复重配置执行单元的功能。每次修复后的执行单元都能完成既定的逻辑运算功能, 但其内部的电路拓扑结构未必相同。这一特点丰富了其内部电路冗余设计的多样性, 也因此而提高了系统抗随机电磁损伤事件的能力, 满足了其在复杂电磁环境下安全可靠运行的要求。

在系统的设计阶段难以准确预计和模拟实际应用环境的影响和内部单元的失效, 因此, 下一步将利用静电放电、方波脉冲、连续波等电磁干扰环境探索在线自修复原型系统的抗干扰性能。

参考文献

- [1] Sekanina L, Drábek V. Theory and Applications of Evolvable Embedded Systems[C]//Proc. of ECBS'04. Brno, Czech: [s. n.], 2004.

(下转第16页)