

数字电路瞬态故障低能耗自修复方法

司慧玲

(郑州工业应用技术学院机电工程学院, 郑州 451100)

摘要 当前大多数数字电路瞬态故障修复方法需在人工处理下才可完成, 修复效率低且能耗高。为此, 提出一种新的数字电路瞬态故障低能耗自修复方法。设计了一种修复系统, 其主要由自律控制模块与重配置执行模块构成, 自律控制模块的核心是嵌入式 Nios II 处理器。数字电路在出现瞬态故障的情况下, 通过小波神经网络算法对数字电路瞬态故障进行诊断, 判断电路是否正常运行。重配置执行模块包括逻辑计算节点 LC 与内部互联网络, 主要作用是维持数字电路功能以及与其他模块之间施行信息传递。实验结果表明, 所提方法能够有效诊断故障, 故障修复成功率和平均适应度高, 整体性能强。

关键词 数字电路 瞬态故障 低能耗 自修复

中图法分类号 TP331.2 TM932; **文献标志码** A

目前数字电路已经在不同产品上被广泛使用, 在使用的过程中数字电路往往会出现一些瞬态故障, 导致产品不能正常工作^[1,2]。因此如何低能耗解决数字电路的瞬态故障已经成为相关设计者面临的一大挑战^[3]。为了使产品能够可靠持续的工作, 需利用自动修复技术对数字电路瞬态故障进行处理^[4,5]。

文献[6]通过电磁防护仿生方法处理数字电路瞬态故障, 该方法依据生物自身拥有较强的抗干扰能力与电磁感应, 并与传统的容错、防干扰以及预防等技术相结合, 通过仿生学方法构造相应的仿生模型, 可在不同层次处理电路故障, 但电路在修复的过程中会消耗大量的能源; 文献[7]通过 R1 与 R2 两个功能性函数模块对数字电路瞬态故障进行修复, 把这两个模块相连构建出新的模块, 用它代替电路的逻辑门, 也就是把这两个具有可逆性的逻辑门作为一个整体对数字电路进行修复, 两个逻辑门同时工作, 保证了数字电路持续运行的稳定性, 大大增加了原件使用寿命, 但该方法修复效果不佳; 文献[8]通过 DRG 模块实现对数字电路的修复, 该方法通过建立 DRa 与 DRb 两个监测模块对数字电路进行实时监测, 根据其输出信号是否一样判定数字电路是否出现故障, 从而实现电路修复。该方法实现过程

简单, 然而其需要在人工处理下才能完成, 加大了人员的工作量, 降低了工作效率。

针对上述方法的弊端, 提出一种新的数字电路瞬态故障低能耗自修复方法。实验结果表明, 所提方法能够有效诊断故障, 故障修复成功率和平均适应度高, 整体性能强。

1 数字电路瞬态故障低能耗自修复方法

1.1 数字电路瞬态故障低能耗自修复系统设计

为了实现数字电路瞬态故障低能耗自修复, 设计了一种修复系统, 其主要由两大部分组成, 分别是自律控制模块与重配置执行模块, 其中自律控制模块是系统的核心, 它的主要作用是数字电路瞬态故障检测、产生配置信息, 同时将其传输至重配置模块进行特定逻辑计算^[9]; 重配置执行模块主要作用是维持数字电路功能以及与其他模块之间施行信息传递^[10]。图 1 描述的是系统总体框架。

1.2 自律控制单元设计

自律控制模块的核心是嵌入式 Nios II 处理器, 数字电路在出现瞬态故障的情况下, 通过小波神经网络算法对数字电路瞬态故障进行诊断, 判断电路是否正常运行。该模块不仅可以阻隔故障位置, 还可以成功对特定功能的信息进行配置^[11]。下面介绍数字电路瞬态故障诊断过程。

1.2.1 数字电路瞬态故障特征提取

采用小波包分析方法对数字电路瞬态故障特征进行提取。小波包分析方法基本原理为对时间与频率都能改变的时频进行局部化分析^[12]。也就是处于低频状态下, 其频率分辨率很高, 时间分辨率很低, 处于高频状态时则与之相反。

2017年3月31日收到

作者简介: 司慧玲(1981—), 女, 汉族, 河南许昌人, 硕士, 讲师。研究方向: 电子设计、电气控制。E-mail: sihuiling788@163.com。

引用格式: 司慧玲. 数字电路瞬态故障低能耗自修复方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 257—262

Si Huiling. Self repairing method for transient fault and low energy consumption of digital circuit [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(30): 257—262

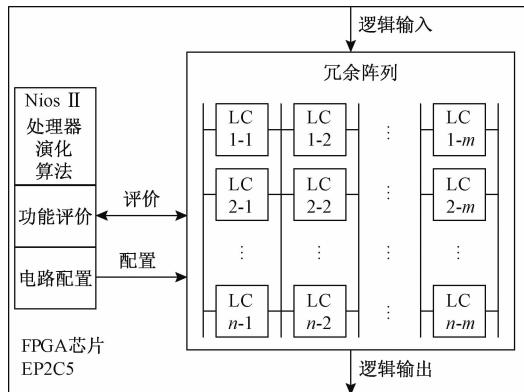


图 1 系统总体框架

Fig. 1 System framework

数字电路随着输入检测信号的改变发生变化,当电路出现瞬态故障时,输出的波形有很大波动,与正常电路输出的波形截然不同,依据输出的波形可以看出,同一频段中的信号能量存在很大区别,意味着各频率信号能量中存在大量数字电路瞬态故障信息^[13]。所以,通过用能量反映故障的方法对数字电路瞬态故障施行查找,不用考虑数字电路的模型构造,只需通过信号频率能量就能实现故障特征提取的目的。

采用小波包分析方法对数字电路瞬态故障特征进行提取的过程如下。

(1) 对输入不同电流的信号完成小波包分解。设电流信号 S 通过小波包分解后第 i 层第 j 个节点的小波包分解系数为 $X_{i,j}$ 。

(2) 重新构建小波包分解系数,用 $S_{i,j}$ 描述 $X_{i,j}$ 的单支重构信号;用 S' 描述总信号,其公式描述如下:

$$S' = \sum_{j=1}^{2^i} S_{i,j} \quad (1)$$

(3) 计算各个频段信号的总能量,其计算公式为

$$E_{i,j} = \int |S_{i,j}|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{i,j}|^2 \quad (2)$$

式(2)中, $x_{i,j}$ 用于描述重构信号 $S_{i,j}$ 离散点的幅值。

(4) 构建特征向量,当数字电路发生瞬态故障时,会对各频段中信号的能量产生干扰,利用能量构建一个特征向量,公式描述如下:

$$\mathbf{T} = [E_{i,1}, E_{i,2}, \dots, E_{i,2^i}] \quad (3)$$

依据每个备选特征对不同故障的不同波形提取数字电路瞬态故障特征,获得最终特征系数,并将其当成瞬态故障特征向量^[14]。

1.2.2 数字电路瞬态故障诊断

神经网络存在结构特征与能力特征,数字电路

故障形式与故障特征量间呈繁琐非线性关系^[15]。依据提取的数字电路瞬态故障特征,通过神经网络方法对瞬态故障进行诊断。

将通过小波包提取的数字电路瞬态故障特征向量作为神经网络的输入,用 N 描述瞬态故障特征向量的维数,那么神经网络输入层节点数量亦为 N ^[16]。因为故障特征向量的量级存在很大差异,因此完成归一化操作后,才可输出神经网络。

对神经网络输出进行确定时,假设数字电路存在 M 种不同的故障类型,则神经网络输出可描述成 $\{y_1, y_2, \dots, y_i, y_M\}$,如果数字电路处于模式 i ,那么 $y_i = 0$,其他都取 1,也就是神经网络输出是 $\{1, 1, \dots, 0, 1\}$ 。

选用三层神经网络。在三层神经网络中,隐含层神经元数量 n_1 、输入层神经元数量 N 以及输出元数量 M 间存在以下关系:

$$n_1 = a \sqrt{N + M} \quad (4)$$

式(4)中, a 用于描述 1~10 之间的常数。

网络训练通过逐渐调整权值与阈值,尽可能降低神经网络的输出误差^[17]。完成神经网络的训练后,将测试样本输入神经网络中,通过学习获取输出结果,从而得到数字电路的故障类型。

1.3 重配置执行模块设计

系统重配置执行模块包括逻辑计算节点 LC 与内部互联网络,其结构图用图 2 进行描述。

图 2 中,各个计算点和计算函数对应,通过内部互联网对这些函数间的数据进行管理。因此,重配置执行模块组成的数字电路能够进行指定逻辑运算。

逻辑计算节点主要由计算函数簇、输入输出多路开关与配置寄存器组成。计算函数簇拥有 8 种类别的运算函数^[18];输入输出多路的作用为对内部互联网和计算函数簇间的信息交换进行调控;配置寄存器的作用是对配置信息进行存储,同时根据配置

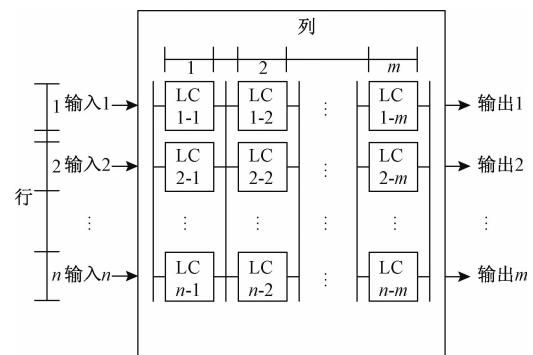


图 2 重配置执行模块结构图

Fig. 2 Reconfiguration execution module structure

信息挑选计算函数簇与调控输入输出多路开关^[19,20]。

2 实验结果分析

2.1 测试电路及瞬态故障生成

为了验证提出方法的有效性,需要进行相关的实验分析,实验现场图用图3进行描述。实验测试的数字电路图用图4进行描述。



图3 实验现场

Fig. 3 Experimental site

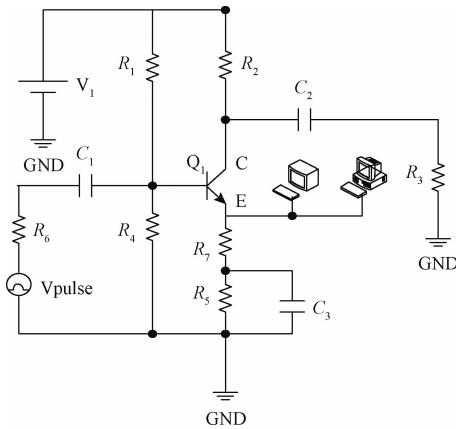


图4 测试电路

Fig. 4 Test circuit

在生成瞬态故障的过程中,首先对电路进行瞬态分析,输入方波信号。选择1~100 ms一百个时间点的电压数据作为测试数据。

图5描述的是正常状态、 R_1 断路、 Q_1 C极与E极短路状态下数字电路的瞬态响应曲线,正常状态和瞬时故障状态曲线存在很大差异,能够有效对其进行区分。

2.2 瞬态故障诊断测试

数字电路瞬态故障诊断是数字电路瞬态故障修复的基础,如果故障诊断错误,则相应的修复处理将无任何意义,导致资源使用率降低,能耗大大增加。

采用本文方法对测试数字电路瞬态短路故障进行诊断,输出电路瞬时响应曲线用图6进行描述。

分析图6可以看出,通过本文方法对数字电路短路故障进行诊断,输出瞬态响应曲线与实际短路故障响应曲线基本相同,说明本文方法诊断可靠

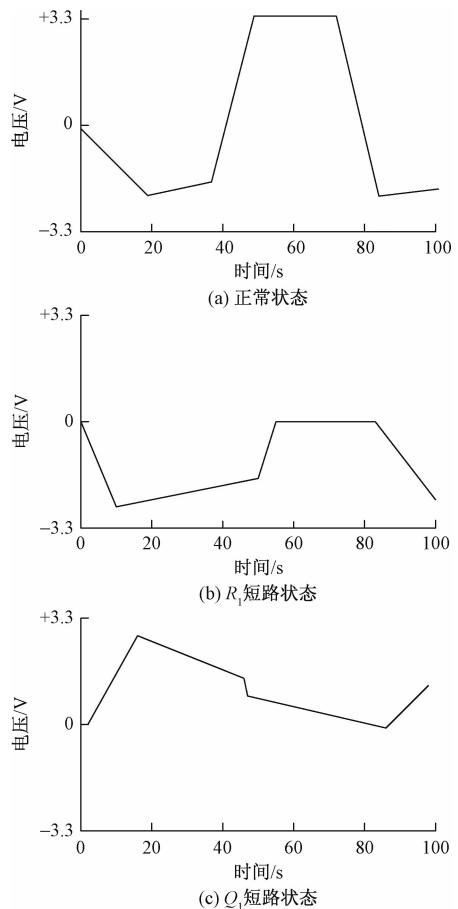


图5 正常和瞬态故障状态下电路响应曲线
Fig. 5 Circuit response curves under normal and transient faults

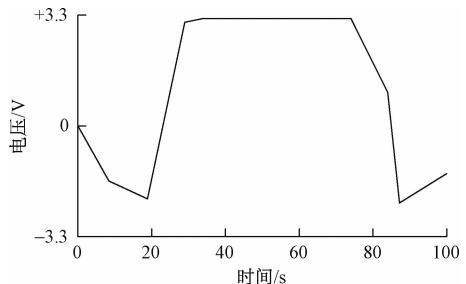


图6 本文方法故障诊断结果
Fig. 6 Fault diagnosis results of this method

性高。

2.3 数字电路瞬态故障修复有效性测试

将平均修复成功率、平均适应度作为衡量指标,将仿生方法和DRG方法作为对比,验证本文方法的修复能力。

平均修复成功率是修复方法对电路瞬态故障修复可靠性的体现,平均修复成功率越高,说明修复方法的可靠性越高,可用性越强,其计算公式如下:

$$MRR = \frac{X_c}{X_a} \quad (5)$$

式(5)中, X_c 用于描述一段时间内修复方法修复成

功的故障数量; X_a 用于描述相同时间段内所有测试电路的所有故障数量。

平均适应度是修复方法面临不同瞬态故障和不同测试环境修复保持能力的体现, 平均适应度越高, 则修复方法应对不同问题的能力越强, 其计算公式如下:

$$W = mMRR_1 \quad (6)$$

式(6)中, m 用于描述修复能力指数; MRR_1 用于描述修复方法面对不同问题的平均修复率。

针对测试电路, 在瞬态故障数量逐渐增加的情况下, 分别采用本文方法、仿生方法和 DRG 方法对瞬时故障进行修复, 3 种方法修复成功率比较结果用图 7 进行描述。

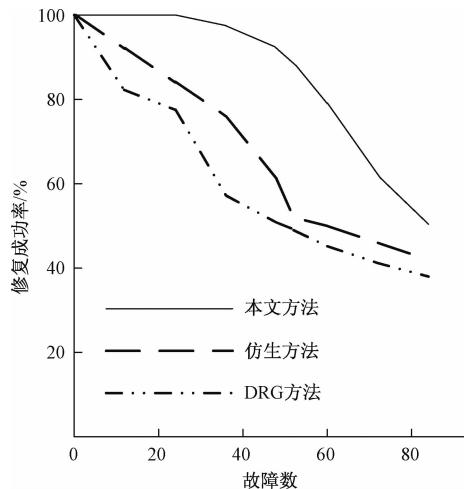


图 7 3 种方法修复成功率比较结果

Fig. 7 Comparison of the success rates of the three methods

分析图 7 可以看出, 随着故障数量的逐渐增加, 本文方法、仿生方法和 DRG 方法的故障修复成功率均呈下降趋势, 但本文方法的故障修复成功率一直高于仿生方法和 DRG 方法, 说明本文方法修复效果更好。

为了检验在不同故障数量下, 本文方法对数字电路瞬态故障的自修复能力, 下面进行随机故障数量逐渐增加的修复实验, 在 20 s 内, 对电路故障数量逐渐增加情况下, 本文方法、仿生方法和 DRG 方法修复效果进行比较, 结果用表 1 进行描述。

分析表 1 可以看出, 采用本文方法对测试数字电路进行修复, 平均修复成功率明显高于仿生方法和 DRG 方法, 在 20 s 内, 当故障数量为 21 个时, 本文方法的修复成功率是 61.5%; 在故障数量达到 22 个的情况下, 本文方法的修复成功率约是 53.7%; 所以本文方法 20 s 内能够有效完成修复的最大故

表 1 3 种方法修复结果比较

Table 1 Comparison of the results of the three methods

故障 个数	本文方法		仿生方法		DRG 方法	
	平均适 应度/%	平均修 复率/%	平均适 应度/%	平均修 复率/%	平均适 应度/%	平均修 复率/%
3	18	100	17.4	82.1	17.8	92.4
6	18	100	17.1	78.2	17.5	84.2
9	17.9	97.8	16.6	57.4	17.2	78.4
13	17.8	92.4	16.2	51.2	16.9	61.5
15	17.7	88.5	15.9	49.5	16.4	52.4
18	17.3	79.2	15.6	45.4	16.1	50.2
21	16.9	61.5	15.2	41.1	15.8	47.4
22	16.5	53.7	14.9	38.6	15.5	42.7

障数量是 21 个, 而仿生方法可完成有效修复的最大故障数量是 13 个, DRG 方法是 15 个, 说明本文方法修复能力更强。且在故障数量相同的情况下, 本文方法平均适应度明显高于仿生方法和 DRG 方法, 进一步验证了本文方法的有效性。

2.4 修复性能测试

一种可行性高, 能够被广泛应用的修复方法不仅需要很强大的修复能力, 也要有很高的修复性能。本节通过修复时间和能耗对本文方法的修复性能进行测试。

表 2 描述的是随故障数量的逐渐增加, 本文方法、仿生方法和 DRG 方法修复时间与能耗比较结果。

表 2 3 种方法修复性能比较结果

Table 2 Comparison of repair performance of the three methods

故障 个数	本文方法		仿生方法		DRG 方法	
	修复时 间/s	能耗/ J	修复时 间/s	能耗/ J	修复时 间/s	能耗/ J
20	2.5	250	3.6	720	5.8	1 740
40	3.4	340	4.2	840	6.2	1 860
60	3.7	370	4.9	980	7.8	2 340
80	4.2	420	5.6	1 120	8.2	2 460
100	4.8	480	6.2	1 240	9.6	2 880

分析表 2 可以看出, 在故障数量逐渐增加的情况下, 3 种方法的修复时间和能耗均逐渐增加, 但在故障数量相同的情况下, 本文方法的修复时间与修复能耗一直低于仿生方法和 DRG 方法, 说明本文方法整体修复性能高。

3 结论

提出一种新的数字电路瞬态故障低能耗自修复方法, 设计了一种修复系统, 其主要由自律控制模块与重配置执行模块构成, 通过小波神经网络算法对数字电路瞬态故障进行诊断, 判断电路是否正常运

行。实验结果表明,所提方法能够有效诊断故障,故障修复成功率和平均适应度高,整体性能强。

参 考 文 献

- 1 梁华国,袁德冉,闫爱斌,等.考虑单粒子多瞬态故障的数字电路失效概率评估.计算机辅助设计与图形学学报,2016;28(3):505—512
Liang Huaguo, Yuan Deran, Yan Aibin, et al. Failure probability estimation for digital circuits considering single event multiple transients. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2016; 28 (3):505—512
- 2 王涛,蔡金燕,孟亚峰.一种基于LUT和二模冗余的胚胎数字电路故障检测方法.微电子学与计算机,2016;33(7):102—105
Wang Tao, Cai Jinyan, Meng Yafeng. A new embryonic digital circuit fault detection method based on LUT and dual modular redundancy. Microelectronics & Computer, 2016;33(7):102—105
- 3 刘奕君,张立,赵强,等.基于分布式视频编码的低能耗视频传感器节点研究.计算机测量与控制,2015;23(1):329—332
Liu Yijun, Zhang Li, Zhao Qiang, et al. Research of low energy consumption video sensor node based on distributed video coding. Computer Measurement & Control, 2015;23(1):329—332
- 4 Gomes I A C, Martins M G A, Reis A I, et al. Exploring the use of approximate TMR to mask transient faults in logic with low area overhead. Microelectronics Reliability, 2015;55(9—10):2072—2076
- 5 杨尊松,王立新,肖超,等.瞬态电压抑制二极管的概述和展望.电子设计工程,2016;24:108—112
Yang Zunsong, Wang Lixin, Xiao Chao, et al. A review of transient voltage suppression diodes. Electronic Design Engineering, 2016;24: 108—112
- 6 薛芸,张杰.北方寒冷地区建筑外界面结构低能耗优化设计.计算机仿真,2016;33(11):229—232
Xue Yun, Zhang Jie. The northern cold region low energy consumption building outside surface structure optimization design. Computer Simulation, 2016;33(11):229—232
- 7 赵甜甜,孟相如,赵志远.基于覆盖网构建的网络多链路故障恢复策略.科技通报,2016;32(10):170—174
Zhao Tiantian, Meng Xiangru, Zhao Zhiyuan. Recovery strategy from network multi-link failures based on overlay network constructing technique. Bulletin of Science and Technology, 2016; 32 (10) : 170—174
- 8 Xu X, Geng W, Yang G, et al. LEDFD: a low energy consumption distributed fault detection algorithm for wireless sensor networks. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014; (2):1—10
- 9 郑笔耕,王恒.面向智能家居和改进UDP协议的低能耗物联网网关设计.科学技术与工程,2014;14(7):253—256
Zheng Bigeng, Wang Heng. Design of internet of things gateway based on improved UDP protocol and intelligent home security and defense. Science Technology and Engineering, 2014;14(7):253—256
- 10 白丽娜,周渭,惠新明,等.频率标准瞬态稳定度的精密测量.西安电子科技大学学报(自然科学版),2014;41(2):102—106
Bai Lina, Zhou Wei, Hui Xinming, et al. Precise measurement of the transient stability of frequency standards. Journal of Xidian University (Natural Science), 2014;41(2):102—106
- 11 Li Z, Han Y, Xu P. Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: an overview. Applied Energy, 2014;124(7):325—334
- 12 Abba S, Lee J A. An autonomous self-aware and adaptive fault tolerant routing technique for wireless sensor networks. Sensors, 2015;15 (8):20316—20354
- 13 王强,刘岩松,陈祥雪,等.具有低能耗辅助电路的并联谐振直流环节逆变器.电子学报,2014;42(7):1369—1373
Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Parallel resonant DC link inverter with low-loss auxiliary circuit. Acta Electronica Sinica, 2014;42(7):1369—1373
- 14 Garcia A P, Rocha I C L, Santos P H F D, et al. Low energy consumption synthesis of nanostructured TiO₂ particles by combining oxidant peroxide method and microwave-assisted hydrothermal treatment. Journal of Nanomaterials, 2016; (19):1—9
- 15 鲍艳.低能耗YAG激光器的研究与实现.中国西部科技,2015;27(8):8—9
Bao Yan. Research and implementation of low energy consumption Nd:YAG Laser. Science and Technology of West China, 2015;27 (8):8—9
- 16 Xiong Y, Lu C, Wu M, et al. A low energy consumption storage method for cloud video surveillance data based on SLA classification. Mobile Information Systems, 2016; (2):1—13
- 17 易昕,毛晓光,纪涛.面向程序自动修复的缺陷分类方法研究.计算机应用研究,2016;33(6):1748—1751
Yi Xin, Mao Xiaoguang, Ji Tao. Research on defect classification method of automated program repair. Application Research of Computers, 2016;33(6):1748—1751
- 18 王良鸣,李柏岩,王劲松.基于信号匹配算法的数字录音带检测与自动修复.计算机应用与软件,2016;33(1):131—133
Wang Liangming, Li Baiyan, Wang Jinsong. Dat detection and automatic recovery based on signal matching algorithm. Computer Applications and Software, 2016;33(1):131—133
- 19 Silvani X, Morandini F, Innocenti E, et al. Evaluation of a wireless sensor network with low cost and low energy consumption for fire detection and monitoring. Fire Technology, 2015;51(4):1—23
- 20 Chen Z, He M, Liang W, et al. Trust-aware and low energy consumption security topology protocol of wireless sensor network. Journal of Sensors, 2015; (1):1—10

Self Repairing Method for Transient Fault and Low Energy Consumption of Digital Circuit

SI Hui-ling

(Electromechanic Engineering College , Zhengzhou University of Industrial Technology , Zhengzhou 451100 , P. R. China)

[Abstract] At present, most of the digital circuit transient fault repair methods need to be completed by manual processing, the repair efficiency is low and the energy consumption is high. For this, a new kind of digital circuit fault transient low energy self repair method was put forward, design a repair system, which is mainly composed of self reconfiguration control module and execution module, self-discipline of the core control module is embedded Nios processor, digital circuit in the presence of transient fault. The wavelet neural network algorithm the diagnosis of digital circuit transient fault judging circuit, whether the normal operation of. The reconfiguration execution module consists of a logical computing node LC and an internal interconnection network. The main function is to maintain the function of the digital circuit and carry out the information transmission between the other modules. The experimental results show that the proposed method can effectively diagnose the fault, the success rate and the average fitness of the fault repair are high, and the overall performance is strong.

[Key words] digital circuit transient fault low energy consumption self repairing