

胚胎电子细胞的部分基因循环存储结构*

朱 赛,蔡金燕,孟亚峰,李丹阳

(军械工程学院 电子与光学工程系,河北 石家庄 050003)

摘要:为了在保证胚胎电子系统可靠性的前提下降低系统的硬件消耗,提出一种新型的基因存储结构——部分基因循环存储,细胞只存储阵列的部分基因,通过细胞内、细胞间的基因循环、非循环移位实现阵列的功能分化和自修复,自修复过程中基因存储内容根据故障细胞数目进行自主更新。该存储结构中基因备份数目可由设计者根据系统可靠性和硬件消耗要求设置,不受阵列中空闲资源数目的限制。理论分析和仿真实验表明,该新型存储结构不仅实现了胚胎电子阵列的功能分化、自修复等功能,而且能够在保证系统可靠性的同时降低硬件消耗,具有较高的工程应用价值。

关键词:胚胎电子阵列;基因存储;循环移位;可靠性;自修复;基因更新

中图分类号:TP302.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)01-078-08

Structure of partial-DNA cyclic memory for embryonics cell

ZHU Sai, CAI Jinyan, MENG Yafeng, LI Danyang

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

Abstract: In order to reduce the hardware cost of embryonics system on the promise of ensuring system reliability, a novel genome memory structure—partial-DNA cyclic memory was presented, and only part of the system's DNA was stored. The embryonics array's functional differentiation and self repairing were achieved through the gene cyclic and non-cyclic shift in the cell and between cells, and the genes stored in memory were updated during the self repairing process. In this memory structure, the gene backups were set according to actual demand of system reliability and hardware cost, which were independent from the number of idle resources in embryonics array. Theoretical analysis and simulation results show that the new genome memory structure can not only achieve embryonics array's functional differentiation and self-repair, but also can ensure system reliability and reduce hardware cost, and it has a high practical engineering value.

Key words: embryonics array; genome memory; cyclic shift; reliability; self repairing; genome update

胚胎电子阵列是一种新型的仿生电子硬件,基于该硬件实现的目标电路具有快速自修复能力,能够大大提高电子系统的可靠性^[1-2]。经典的电子细胞结构中,95%的硬件消耗由基因存储产生^[3],因此自胚胎电子电路提出以来,基因存储就受到研究者的重视。在经典的全存储^[4]基础上,以降低硬件消耗为目标,提出了行/列存储^[5]、部分基因存储^[6]、循环变形存储^[7]、循环备份存储^[8]、原核细胞存储^[9-12]等多种存储结构。不同的基因存储中,细胞存储基因数目不同,阵列中每种基因的总数目(基因备份数目)也不同。基因备份数目与系统的可靠性、硬件消耗密切相关,而已有的基因存储结构无法在确定的阵列规模下进行基因备份数目的

选择。

部分基因存储^[6]中基因备份数目可变,但与阵列中空闲行、列数目相关。当胚胎电子阵列及目标电路规模确定时,其可靠性和硬件消耗为固定值,无法根据设计者需求改变。

本文提出了一种新型的基因存储结构——部分基因循环存储,该存储支持设计者任意选择基因备份数目,电子细胞只存储自身和其后若干相邻细胞的表达基因,细胞内部的基因间具有循环、非循环移位能力,以此为基础完成阵列的分化和自修复。对提出的基因存储进行了可靠性和硬件消耗分析,分析表明,所提存储结构能够通过选择基因备份数目在保证系统可靠性的同时降低硬件消耗。

* 收稿日期:2015-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271153,61372039)

作者简介:朱赛(1987—),男,河南郸城人,博士研究生,E-mail:szhumail@163.com;

蔡金燕(通信作者),女,教授,博士,博士生导师,E-mail:radarc@126.com

1 部分基因循环存储结构

1.1 基因存储结构

设胚胎电子阵列中细胞数目为 n , 第 i 个细胞的表达基因为 $g_i (1 \leq i \leq n)$ 。为了便于基因的循环移位及自修复, 设置空闲基因 g_0 , 若第 j 个细胞为空闲细胞, 则其表达基因 $g_j = g_0$ 。

阵列中基因存储如图 1 所示, n 个细胞的基因存储依次首尾相接, 细胞存储自身和 $k-1$ 个后续相邻细胞的表达基因, 第 $i (1 \leq i \leq n)$ 个细胞 C_i 存储基因为其表达基因 g_i 和后续 $k-1$ 个细胞的表达基因 $g_{i+1} \sim g_{i+k-1}$, 对于空闲细胞, 依然按照该规律进行存储。对于第 n 个细胞, 其后的 $k-1$ 个细胞分别为 C_1, C_2, \dots, C_{k-1} 。

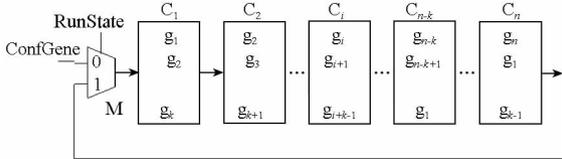


图 1 阵列中基因存储

Fig. 1 Gene memory of embryonics array

图 1 所示阵列中 C_1 为母细胞, 2-1 多路复用器 M 控制母细胞的输入; RunState 为阵列运行状态控制信号, 当 RunState 为 0 时, 阵列为功能分化状态, RunState 为 1 时, 阵列为运行状态; ConfGene 为功能分化过程中的基因配置串; 阵列正常运行时, 母细胞接收 C_n 细胞的基因输出, 整个阵列构成基因存储闭环, 进行基因移位操作。

电子细胞结构如图 2 所示, 由逻辑模块 (Logical Block, LB)、开关盒 (Switch Box, SB)、修复控制电路 (repair control circuit) 和基因存储 (gene memory) 组成。基因存储中, GeneInput 为输入基因, GeneOutput 为输出基因; 基因存储单元具有 k 个基因存储寄存器 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k$, 每个寄存器存储一个基因, 且第一个寄存器 r_1 存储细胞表达基因, 配置 LB 和 SB 功能; 第 i 个寄存器 r_i 的输出为 $r_i o$; M_i 为 2-1 多路复用器, 由修复控制电路产生的 $C_i S$ 信号控制; 修复控制电路控制基因存储单元移位。

相邻电子细胞 GeneInput 端和 GeneOutput 端相连, 整个阵列中的基因存储组成如图 1 所示环状结构, 进行细胞间基因信息的传输。

1.2 基因移位方式

基因存储中通过基因移位完成功能分化、自修复中所需的各种基因操作, 有顺时针非循环移

位、顺时针循环移位和逆时针循环移位三种, 由移位控制信号 $C_i S$ 控制执行。

顺时针非循环移位: 移位控制信号 $C_i S$ 为 00, 基因由 M_0 的 0 端进入, 在时钟控制下, 经各 2-1 多路复用器的 0 端依次在 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k$ 上移动, r_k 上的基因信息舍弃。

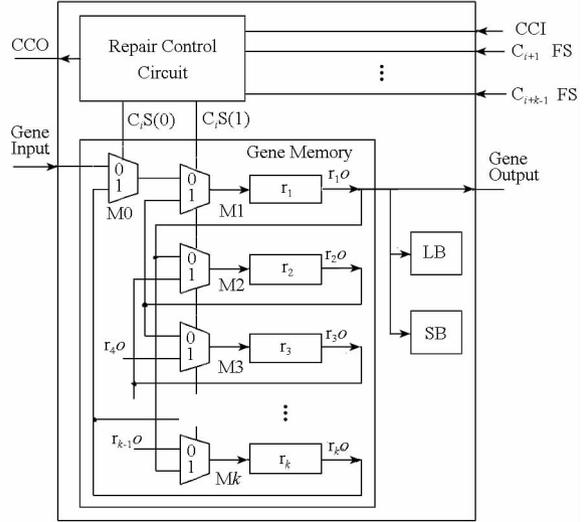


图 2 具有部分基因循环存储的细胞结构

Fig. 2 Structure of cell with partial-DNA cyclic memory

顺时针循环移位: 移位控制信号 $C_i S$ 为 01, 在时钟驱动下, 基因依次在 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k, r_1$ 上移动, r_k 上的基因信息经 M_0 的 1 端和 M_1 的 0 端移位到 r_1 上。逆时针循环移位: 移位控制信号 $C_i S$ 为 1x, 基因经各 2-1 多路复用器的 1 端依次在 $r_k, r_{k-1}, r_{k-2}, \dots, r_1, r_k$ 上移动; r_1 上的基因信息移位到 r_k 上。

通过三种移位方式的组合, 进行阵列的功能分化和自修复。

2 阵列的功能分化

阵列的功能分化过程, 即为确定每个细胞的基因存储的过程, 在全局时钟的控制下, 基因配置串由 2-1 多路复用器 M 的 0 端进入母细胞, 通过细胞间和细胞内的移位完成阵列的功能分化。

对于具有 n 个电子细胞、基因备份数目为 k 的胚胎电子阵列, 功能分化过程如图 3 所示, 其中 clk 为全局时钟信号, $g_1 g_2 \dots g_n g_1 \dots g_{k-1}$ 为输入的基因配置串, 其送入 C_1 细胞的次序为 g_{k-1} 到 g_1 。

在全局时钟 clk 的控制下, 基因配置串依次输入至 C_1 细胞的 r_1 寄存器, 并由此开始细胞间和细胞内两个方向的移位: 细胞间基因由 C_1 细胞的 r_1 寄存器依次移位至 C_2 的 r_1 寄存器、 C_3 的 r_1 寄存器... 直至 C_n 的 r_1 寄存器, 如图 3 中横向箭

头所示;细胞内基因进行顺时针非循环移位,基因移动方向如图 3 中竖向箭头所示。经过 $n + k - 1$ 个周期的移位,所有基因移位到相应的寄存器中,完成阵列分化过程。

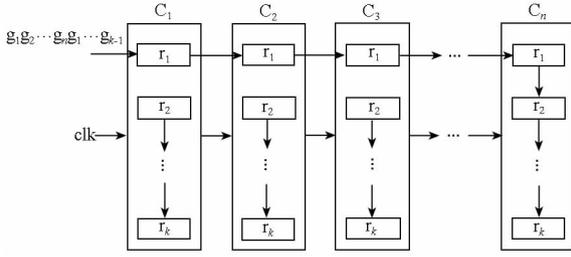


图 3 阵列分化过程

Fig. 3 Embryonics array's differentiation process

对于具有 5 个细胞 cell1, cell2, cell3, cell4, cell5 的胚胎电子阵列;细胞表达基因分别为 g_1, g_2, g_3, g_4, g_0 , 即 cell5 为空闲细胞。若其基因备份数目为 3, 每个细胞存储 3 个基因: 自身和其后两个相邻细胞的表达基因。分化过程中阵列的输入基因配置串为 $g_1 g_2 g_3 g_4 g_0 g_1 g_2$, 经过 $5 + 3 - 1 = 7$ 个时钟的移位, 阵列完成分化, 分化过程中细胞内基因变化如表 1 所示。

表 1 阵列分化过程基因移位

Tab. 1 Gene shifting in differentiation process

step	cell1	cell2	cell3	cell4	cell5
1	g_2 xx	x xx	x xx	x xx	x xx
2	$g_1 g_2$ x	g_2 xx	x xx	x xx	x xx
3	$g_0 g_1 g_2$	$g_1 g_2$ x	g_2 xx	x xx	x xx
4	$g_3 g_0 g_1$	$g_0 g_1 g_2$	$g_1 g_2$ x	g_2 xx	xxx
5	$g_3 g_4 g_0$	$g_4 g_0 g_1$	$g_0 g_1 g_2$	$g_1 g_2$ x	g_2 xx
6	$g_2 g_3 g_4$	$g_3 g_4 g_0$	$g_4 g_0 g_1$	$g_0 g_1 g_2$	$g_1 g_2$ x
7	$g_1 g_2 g_3$	$g_2 g_3 g_4$	$g_3 g_4 g_0$	$g_4 g_0 g_1$	$g_0 g_1 g_2$

表 1 中, 细胞存储的 3 个基因中第一个为表达基因, 用黑体表示。经过 7 个时钟周期, 每个细胞的表达基因移位到第一个寄存器上, 如 step7 所示, 阵列完成分化。

3 阵列的自修复

3.1 自修复过程基因存储的更新

在胚胎电子阵列的自修复过程中, 故障细胞变为“透明”, 其功能由其后正常细胞代替执行, 位于故障细胞后的细胞更新其基因存储。

基因存储的更新由位于故障细胞前面的正常细胞控制完成。细胞根据其后面 $k - 1$ 个邻居细

胞的状态确定是否为控制细胞, 一旦确定为控制细胞, 则计算其后故障细胞数目, 记为 f_{cn} 。然后进行以下修复过程:

1) 控制细胞内的基因首先逆时针循环移位 f_{cn} 次;

2) 控制细胞进行 f_{cn} 次顺时针循环移位, 同时位于故障细胞后面的细胞进行 f_{cn} 次顺时针非循环移位。

在过程 2 中位于故障后面的细胞进行顺时针非循环移位时, 阵列中空闲细胞后的细胞不参与移位, 细胞内空闲基因后的寄存器不参与移位。

经过 $2 \times f_{cn}$ 个周期的基因移位, 完成阵列中细胞基因存储的更新, 自修复过程结束, 耗时 $2 \times f_{cn}$ 个时钟周期。

对于表 1 所示分化完成的胚胎电子阵列, 若 cell3 故障, 则 cell2 为修复控制细胞, 故障数目 $f_{cn} = 1$ 。首先 cell2 进行 1 次逆时针循环移位, 然后 cell2 进行 1 次顺时针循环移位, 同时 cell4, cell5 进行 1 次顺时针非循环移位。经过 2 个周期的移位, cell3, cell4 的表达基因 g_3, g_4 分别移至 cell4, cell5 的第一个基因存储寄存器上, 成为 cell4, cell5 的表达基因, 基因更新完毕, 完成阵列的自修复, 具体过程如表 2 所示。

表 2 阵列自修复过程中基因的更新

Tab. 2 Gene updating in self-repair process

step	cell1	cell2	cell3	cell4	cell5	阵列状态
1	$g_1 g_2 g_3$	$g_2 g_3 g_4$	$g_3 g_4 g_0$	$g_4 g_0 g_1$	$g_0 g_1 g_2$	正常
2	$g_1 g_2 g_3$	$g_2 g_3 g_4$	xxx	$g_4 g_0 g_1$	$g_0 g_1 g_2$	故障
3	$g_1 g_2 g_3$	$g_3 g_4 g_2$	xxx	$g_4 g_0 g_1$	$g_0 g_1 g_2$	故障
4	$g_1 g_2 g_3$	$g_2 g_3 g_4$	xxx	$g_3 g_4 g_1$	$g_4 g_1 g_2$	正常

细胞故障时, 其存储基因也可能同时故障, 故用“xxx”表示故障 cell3 的基因。移位过程中, 位于空闲细胞 cell5 后面的 cell1 不参与移位, cell4 细胞内空闲基因 g_0 后的 g_1 , cell5 细胞内空闲基因后的 g_1, g_2 不参与移位。

3.2 修复控制电路

修复控制电路产生 3.1 节自修复过程所需信号, 主要功能如下:

1) 控制角色判断: 根据后续细胞的状态信号, 确定是否为控制细胞, 判断原则是: ①若其后相邻细胞故障, 则该细胞为控制细胞; ②若同一空闲细胞前出现多个控制细胞, 则最靠近空闲细胞的控制优先级最高, 与空闲细胞距离越远, 其优先

级越低;

2)故障细胞数目计算;

3)产生存储单元的移位控制信号 C_iS ;

4)产生当前细胞和其后细胞的寄存器移位使能信号。

对于细胞 C_i ,为了完成以上功能,设置以下信号:控制使能信号 CE , $CE = 1$,则 C_i 为控制细胞,否则 C_i 不是控制细胞; $C_{i+1}FS$, $C_{i+2}FS$, ..., $C_{i+k-1}FS$ 为其后 $k-1$ 个细胞的故障信号, $C_jFS = 1$,细胞 C_j 故障,否则, C_j 正常; CCI 为后方细胞控制角色信号, $CCI = 1$,表示后方存在控制细胞,否则,后方细胞全部为非控制细胞; CCO 为输出控制角色信号,该信号为前方细胞的 CCI 信号; C_iCE 为寄存器移位使能信号, $C_iCE = 1$,寄存器可以移位, $C_iCE = 0$,寄存器停止移位; OCE 为位于控制细胞后的细胞寄存器移位使能信号, $OCE = 1$,控制细胞后细胞的寄存器可以移位, $OCE = 0$,寄存器停止移位。则功能1、功能2如式(1)、式(2)、式(3)所示。

$$CE = \overline{C_iFS} \times C_{i+1}FS \times \overline{CCI} \quad (1)$$

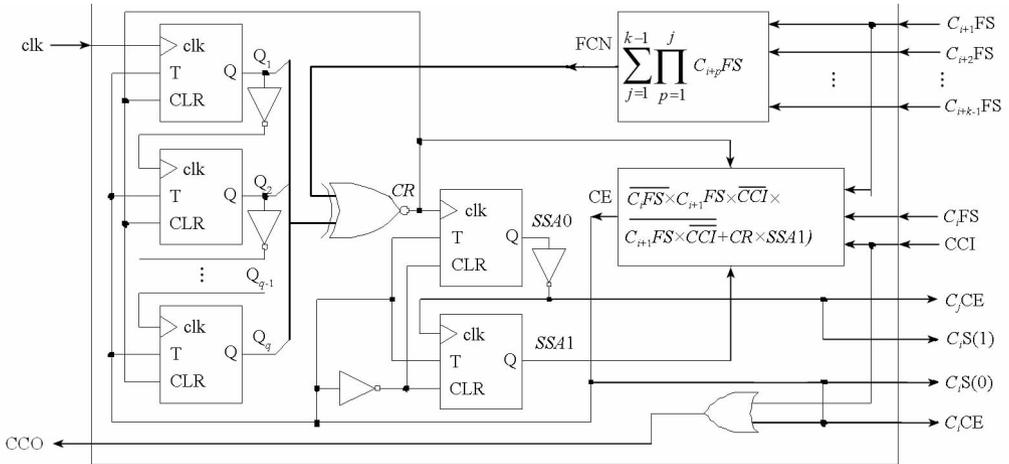


图4 修复控制电路

Fig.4 Repair control circuit

根据各计数器结果 CR , $SSA0$, $SSA1$ 更新各控制信号,更新规则如下:

结合式(1),控制信号更新规则为:

$$CE = \overline{C_iFS} \times C_{i+1}FS \times \overline{CCI} \times CR \times SSA1 \quad (4)$$

控制细胞的移位寄存器移位使能信号 C_iCE 为:

$$C_iCE = CE \quad (5)$$

故障细胞后激活细胞及一个相邻的空闲细胞的寄存器移位使能信号 C_jCE 为:

$$C_jCE = SSA0 \quad (6)$$

当前细胞寄存器移位控制信号 C_iS :

$$fcn = C_{i+1}FS + C_{i+1}FS \times C_{i+2}FS + \dots + C_{i+1}FS \times C_{i+2}FS \times \dots \times C_{i+k-1}FS \quad (2)$$

$$= \sum_{j=1}^{k-1} \prod_{p=1}^j C_{i+p}FS$$

$$CCO = CCI + CE \quad (3)$$

功能3、功能4完成细胞中基因移位更新的控制,使用计数器对移位数目进行计数,当确定细胞执行控制功能时,置细胞移位控制信号 C_iS 为11,并置 C_iCE 为1,开始逆时针循环移位,同时启动计数器,当计数达到 f_{cn} 时,停止移位,清除计数器;置 C_iS 为10,并置 OCE 为1,控制细胞顺时针循环移位,其他细胞顺时针非循环移位,同时启动计数器,当计数至 f_{cn} 时,自修复完成,更新相关信号状态。

为了实现上述功能,设计图4所示修复控制电路。功能1、功能2根据式(2)、式(3)直接采用逻辑电路实现;功能3、功能4实现时,采用D触发器组成计数器,使用 q 位计数器计算移位次数 (q 为 f_{cn} 的二进制数据宽度),并采用2位计数器对移位周期进行计数,判断控制细胞移位状态。

$$\begin{cases} C_iS(0) = CE \\ C_iS(1) = SSA0 \end{cases} \quad (7)$$

4 功能分化、自修复能力实验验证

以文献[5]中的半加器为目标电路,对所提基因存储的分化、自修复能力进行验证。目标电路规模为 4×4 ,胚胎电子阵列规模为 6×5 。采用1.1节的存储结构及3.2节的修复控制电路,在Xilinx ISE 12.2环境中对目标电路进行实现,并利用ISE自带的仿真软件ISim进行功能分化及自修复过程的仿真。

为了便于实验结果的观察,以目标电路中第一列细胞为对象观察其功能分化、自修复过程。第一列细胞的坐标为(0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0), (4, 0), (5, 0);分别记为 C1, C2, C3, C4, C5, C6;其表达基因分别为 3207, 3079, 903, 903, 4097, 4097;其中 4097 为空闲基因,即 C5, C6 为空闲细胞。基因备份数目 $k = 4$, 每个细胞内包含四个基因存储寄存器。

实验过程中监测细胞基因存储器的内容及关键控制信号,时钟周期设置为 20 ns; Cir_{ij} 为第 i 个细胞的第 j 个寄存器存储内容,其中 Cir_{i1} 为第 i 个细胞的表达基因,本实验中 $1 \leq i \leq 6, 1 \leq j \leq 4$ 。

4.1 功能分化实验验证

阵列功能分化过程如图 5 所示,230 ns,阵列的状态控制信号 RunState 置为 0,阵列开始功能分化,同时各寄存器的移位控制信号置为高,开始顺时针非循环移位。按照基因配置串规则,基因配置串 ConfGene 分别置为 903, 3079, 3207, 4097, 4097, 903, 903, 3079, 3207, 依次送入母细胞。在时钟 clk 的驱动下,每个基因由母细胞的 r1 寄存器开始在细胞间和细胞内的寄存器间按照图 4 所示方向进行移位。10 个时钟周期后,在 430 ns,细胞内的四个基因存储寄存器分别存入该细胞和其后三个相邻细胞的表达基因,完成阵列的分化。

4.2 阵列的自修复实验验证

为了验证所提基因存储的自修复能力,对分化后的阵列设置故障,观察其修复过程。分别对相邻多细胞和不相邻多细胞进行故障注入,由于多细胞故障保护单细胞故障,因此未进行单细胞故障自修复实验。

4.2.1 不相邻多细胞故障的自修复

对于正常运行的胚胎电子阵列中不相邻细胞 C2, C4 同时注入故障,其修复过程如图 6 所示。

在 480 ns, C2, C4 细胞同时故障,对外发送细胞故障信号: C2FS, C3FS 同时置为高。自修复过程分为两步:首先 C3 作为控制细胞进行修复,然后 C1 作为控制细胞进行修复,具体如下:

1) C3 为控制细胞:其移位控制信号 C3S 置为 11, 进行一个周期的逆时针循环移位,如 500 ns;然后其移位控制信号置为 01, 进行一次顺时针循环移位,同时 C5 细胞进行一次非循环移位,完成对 C4 细胞的修复,如 520 ns 所示;

2) C1 为控制细胞:在 C3 完成修复过程的同时, C1 的移位控制信号 C1S 置为 11, 开始一个周期的逆时针循环移位,在 540 ns, 逆时针循环移位

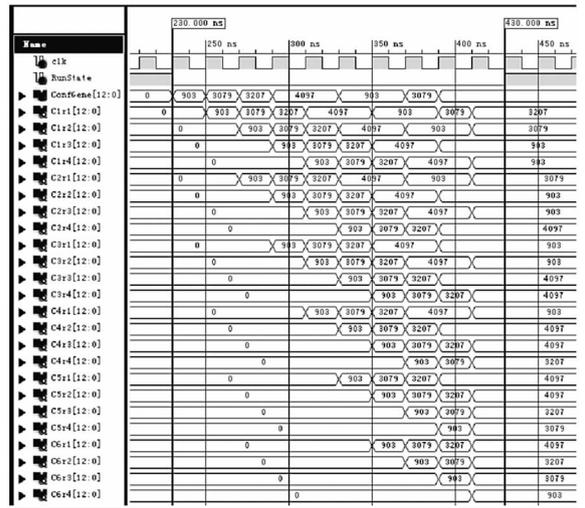


图 5 阵列功能分化过程

Fig. 5 Differentiation process of embryonics array

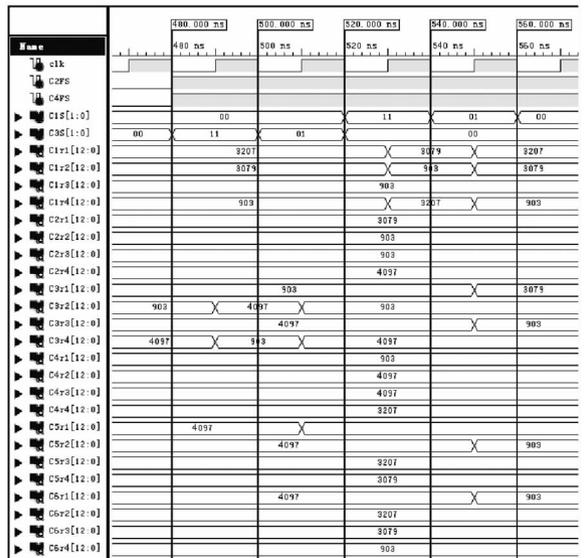


图 6 C2, C4 细胞故障自修复

Fig. 6 Repair process for C2 and C4 fault

完成, C1S 置为 01, 开始一个周期的顺时针循环移位,同时 C4, C5, C6 同时进行一次非循环移位, 560 ns 移位结束。

经过 4 个时钟周期, C1, C2, C3, C4 的表达基因 3207, 3079, 903, 903 分别移位至 C1, C3, C5, C6, 所有基因正常表达, 阵列可执行正常功能。C2, C4 引起的阵列故障被修复, 修复过程耗时 4 个时钟周期。

4.2.2 相邻多细胞故障的自修复

在 480 ns, 对相邻的 C2, C3 细胞同时注入故障, 细胞内自检单元检测到故障向外发送细胞故障信号, C2FS, C3FS 置为高电平。位于故障细胞前侧的 C1 在故障信号的驱动下成为控制细胞, 开始阵列的修复过程, 如图 7 所示, 主要分为

三步:

1) C1 的移位控制信号 C1S 置为 11,细胞内各基因存储寄存器的移位控制信号置为高,在时钟 clk 驱动下,C1 内的基因逆时针循环移位两次,如 520 ns 所示;

2) C1 的移位控制信号 C1S 置为 01,C1 细胞、位于故障细胞后的激活细胞及空闲细胞 C5 内基因存储寄存器的移位控制信号置为高,C1 细胞进行一次顺时针循环移位,而其余细胞进行一次顺时针非循环移位,如 540 ns,在移位过程中,故障细胞 C2,C3 为“透明”状态,C1r1 的内容直接移至 C4r1;

3)继续一次与第二步相同的移位操作,空闲细胞 C6 参与移位,一个时钟周期后,在 560 ns 移位完成。

经过上述三步操作,故障细胞 C2,C3 的表达基因 3079,903 由其后面的细胞 C4,C5 执行;而 C4 的表达基因 903 移至 C6 细胞的 r1 寄存器,由 C6 表达,阵列完成自修复,耗时 4 个时钟周期。

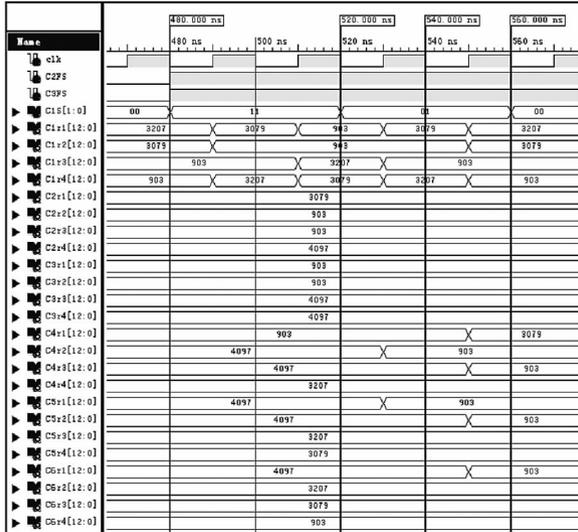


图 7 C2,C3 故障修复过程

Fig. 7 Repair process for C2 and C3 fault

通过实验可以看出,所提出的部分基因循环存储结构通过基因的非循环移位和循环移位,能够完成阵列的分化和各种故障情况下的阵列自修复,且分化、自修复时间较短。

5 基因存储的可靠性、硬件消耗分析

在已有可靠性模型^[13]基础上,结合所设计的基因存储的自修复特点,建立了基于部分基因循环存储的系统可靠性模型;并根据存储的具体实现,建立了硬件消耗模型。以可靠性模型和硬件消耗模型为基础,对所提出的基因存储进行了

分析。

设胚胎电子阵列规模为 $M \times N$,目标电路规模为 $m \times n$,阵列中每个细胞的可靠性符合指数分布,即 $r(t) = e^{-\lambda t}$,基因备份数目记为 k 。

以行移除策略为例,每行中每个工作细胞都可靠则该行可靠,阵列中有 n 行可靠则目标电路可正常工作,则其可靠度

$$R_{rr}(t) = \sum_{i=n}^N C_N^i R_{rr}(t)^i (1 - R_{rr}(t))^{N-i} \quad (8)$$

其中 $R_{rr}(t) = r(t)^m = e^{-m\lambda t}$ 为每一行的可靠度。

5.1 可靠性模型

基于本文存储的系统,细胞故障会导致基因备份数目的降低,但通过基因存储的更新,基因备份数目得到恢复,系统正常运行;若多个细胞同时故障使某基因的备份数目减少至 0,则阵列中不再存在该基因,阵列无法完成自修复,从而出现电路故障。因此其可靠性在传统的可靠性基础上,还须保证目标电路中多列同时故障时,各基因的基因备份数目大于 0,否则阵列将失去自修复能力。

目标电路的 n 列中,当 $g (g \geq k)$ 列同时发生故障时,使电路中基因备份数目减少至 0,即失去自修复能力的概率记为 $P(t)$,则有:

$$P(t) = C_{n-k+1}^g R_{rr}(t)^{n-g} (1 - R_{rr}(t))^g \quad (9)$$

则基于本文存储的系统可靠性为:

$$\begin{aligned} R_{rr}(t) &= R_{rr}(t) \times (1 - \sum_{g=k}^n P(t)) \\ &= \sum_{i=n}^N C_N^i R_{rr}(t)^i (1 - R_{rr}(t))^{N-i} \times \\ &\quad [1 - \sum_{g=k}^n C_{n-k+1}^{g-k+1} R_{rr}(t)^{n-g} (1 - R_{rr}(t))^g] \end{aligned} \quad (10)$$

系统的失效前平均时间 (Mean Time to Failure, MTTF) $MTTF_{rr}$ 为:

$$\begin{aligned} MTTF_{rr} &= \int_0^{\infty} R_{rr}(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} \sum_{i=n}^N C_N^i R_{rr}(t)^i (1 - R_{rr}(t))^{N-i} \times \\ &\quad [1 - \sum_{g=k}^n C_{n-k+1}^{g-k+1} R_{rr}(t)^{n-g} (1 - R_{rr}(t))^g] dt \end{aligned} \quad (11)$$

5.2 硬件消耗模型

部分基因循环存储使用寄存器存储基因。每位基因信息使用一个 D 触发器进行存储,通过触发器间信息的移位实现基因的移位,其控制电路

规模较小,可以忽略不计。

设基因宽度为 w ,即每个基因有 w 位信息;设细胞内存储的基因数目为 p ,经典的上升沿 D 触发器需要 24 个 MOS 管^[14]。则存储消耗 MOS 管数目为:

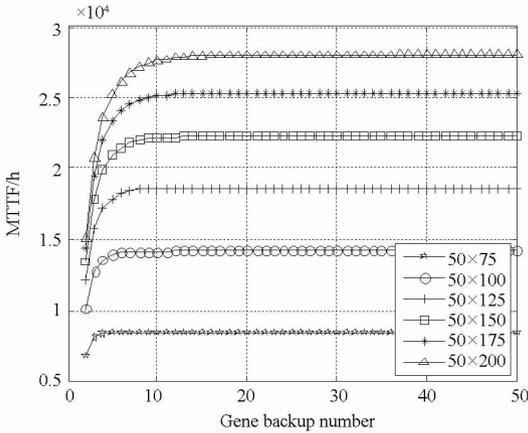
$$Hc = M \times N \times p \times w \times 24 \quad (12)$$

细胞内存储的基因数目等于基因备份数目,则有:

$$Hc = M \times N \times k \times w \times 24 \quad (13)$$

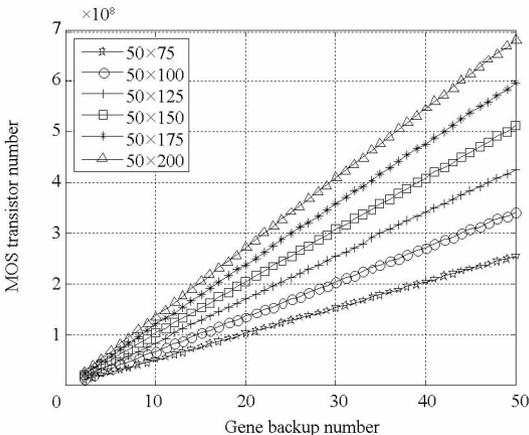
5.3 可靠性、硬件消耗分析

设目标电路规模为 50×50 ,基因宽度为 $57^{[15]}$,基因备份数目变化范围为 $[2, 50]$ 。当阵列规模分别为 $50 \times 75, 50 \times 100, 50 \times 125, 50 \times 150, 50 \times 175, 50 \times 200$ 时,分别由式(11)、式(13)计算系统 MTTF 和存储消耗 MOS 管数目,结果如图 8 所示。



(a) 不同基因备份数目下系统的 MTTF

(a) MTTF of systems with different gene backup number



(b) 不同基因备份数目下存储消耗 MOS 管数目

(b) Hardware overhead under different gene backup number

图 8 不同基因备份数目下的 MTTF

Fig. 8 MTTF under different gene backup number

由图 8(a)可以看出,基于本文存储结构的系统的 MTTF 具有两个特点:在相同基因备份数目

下,系统的 MTTF 随着阵列规模的增加而增加;当阵列规模固定时,系统的 MTTF 可分为两个阶段,当基因备份数目很小时,系统的 MTTF 随基因备份数目的增加而迅速提高,如基因备份数目小于 10 时;当基因备份数目稍大时,系统的 MTTF 随基因备份数目变化较小,趋于稳定。

由图 8(b)可以看出,基因存储消耗 MOS 管数目与基因备份数目呈线性关系,随着基因备份数目的增加而线性上升,且胚胎电子阵列的规模越大,MOS 管数目增加速度越快。

对于规模相同的目标电路和胚胎电子阵列,该存储支持任意选择的基因备份数目,可在较小的基因备份数目下达到较大的系统 MTTF,这是由于自修复过程中基因存储具有自主更新能力,从而提高了系统的可靠性。因此可以通过选择较小的基因备份数目,在保持系统 MTTF 变化不大的情况下,降低硬件消耗,这是该存储结构的优点,且目标电路和胚胎电子阵列的规模越大,该优点越明显。

6 结论

提出一种新型的基因存储结构——部分基因循环存储,电子细胞只存储系统的部分基因,且存储的基因数目不受阵列中空闲资源的限制,可由设计者根据设计需求指定。通过细胞内、细胞间的基因循环、非循环移位进行阵列的功能分化和自修复,分化时间为(细胞个数 + 基因备份数目 - 1)个时钟周期,自修复时间为(故障细胞数目 × 2)个时钟周期,分化、自修复过程迅速。

自修复过程中,通过细胞内基因存储的自主更新,保持基因信息的完整,完成阵列的自修复。理论分析表明,所提存储的自主更新特性使其能够在较小的基因备份数目下达到较大的可靠性,而较小的基因备份数目可以降低系统的硬件消耗,因而该基因存储能够在保证系统可靠性的同时降低硬件消耗。

参考文献 (References)

[1] Kim S, Chu H, Yang I, et al. A hierarchical self-repairing architecture for fast fault recovery of digital systems inspired from paralogous gene regulator circuit[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) System, 2012, 20(12): 2315 - 2328.

[2] Yang I, Jung S H, Cho K H. Self-repairing digital system with unified recovery process inspired by endocrine cellular communication[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) System, 2013, 21(6): 1027 - 1040.

[3] Jackson A H, Canham R, Tyrrell A M. Robot fault-tolerance

- using an embryonic array [C] // Proceedings of the NASA/ Dod Conference on Evolvable Hardware, IEEE, Los Alamitos, 2003; 91 - 100.
- [4] Ortega C, Tyrrell A. Biologically inspired reconfigurable hardware for dependable applications [C] // Proceedings of the IEE Colloquium on Hardware Systems for Dependable Applications, IEE, Stevenage, 1997; 1 - 4.
- [5] Ortega-Sanchez C, Mange D, Smith S, et al. Embryonics; a bio-inspired cellular architecture with fault-tolerant properties [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2000, 1(3): 187 - 215.
- [6] Zhang X, Dragffy G, Pipe A G, et al. Partial-DNA supported artificial-life in an embryonic array [C] // Proceedings of the International Conference on Engineering of Reconfigurable Systems and Algorithms, CSREA, Athens, 2004; 203 - 208.
- [7] Samie M, Farjah E, Dragffy G. Cyclic metamorphic memory for cellular bio-inspired electronic systems [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2008, 9(3): 183 - 201.
- [8] Xu G L, Xia Z H, Wang H B, et al. Design of embryo-electronic systems capable of self-diagnosing and self-healing and configuration control [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(6): 637 - 643.
- [9] Samie M, Dragffy G, Popescu A, et al. Prokaryoticbio-inspired model for embryonics [C] // Proceedings of NASA/ ESA Conference on Adaptive Hardware and System, IEEE, Piscataway, 2009; 171 - 178.
- [10] Samie M, Dragffy G, Tyrrell A M, et al. Novel bio-inspired approach for fault-tolerant VLSI systems [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2012, 21(10): 1878 - 1891.
- [11] Bremner P, Liu Y, Samie M, et al. SABRE: a bio-inspired fault-tolerant electronic architecture [J]. Bioinspiration and Biomimetics, 2013, 8(1): 1 - 16.
- [12] 李岳, 王南天, 钱彦岭. 原核细胞仿生自修复电路设计 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 154 - 157.
LI Yue, WANG Nantian, QIAN Yanling. Self-healing circuit design inspired by prokaryotic cell [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 154 - 157. (in Chinese)
- [13] 张砦, 王友仁. 基于可靠性分析的胚胎硬件容错策略选择方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 236 - 242.
ZHANG Zhai, WANG Youren. Guidelines to fault-tolerant strategy selection in embryonics hardware based on reliability analysis [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(1): 236 - 242. (in Chinese)
- [14] 叶以正, 来逢昌, 肖立伊, 等. 集成电路设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011, 238 - 245.
YE Yizheng, LAI Fengchang, XIAO Liyi, et al. Integrate circuit design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011; 238 - 245. (in Chinese)
- [15] Zhu S, Cai J Y, Meng Y F, et al. A novel structure of embryonics electronic cell array [J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2014, 13: 224 - 232.