

一种 LUT 型胚胎电子阵列的功能分化方法

朱 赛, 蔡金燕, 孟亚峰

(军械工程学院电子与光学工程系, 河北石家庄 050003)

摘 要: 针对 LUT 型胚胎电子阵列功能分化方法的不足, 提出了一种新型的 LUT 型胚胎电子阵列功能分化方法, 根据目标电路的功能描述, 通过前端综合、逻辑优化、逻辑映射、打包等操作, 将目标电路转换为电子细胞为基本节点的电路形式, 通过物理映射、基因库生成, 将电路映射到阵列上, 确定阵列中每个细胞的功能、连接, 最终生成目标电路的基因库并确定每个细胞的表达基因, 完成胚胎电子阵列的功能分化. 该方法无需对计算过程中每一代电路进行功能评估, 运算量小, 计算速度快, 为基于 LUT 型胚胎电子阵列的自修复电路应用提供了设计方法. 最后, 使用一个算例阐述了功能分化过程, 并通过多个电路验证了该方法的分化速度.

关键词: 胚胎电子阵列; 电子细胞; 功能分化; 物理映射; 自修复能力

中图分类号: TP302.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)12-2440-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.12.014

A Functional Differentiation Method for LUT-Based Embryonics Array

ZHU Sai, CAI Jin-yan, MENG Ya-feng

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

Abstract: Aiming at the deficiency of the functional differentiation of LUT-based embryonics array, a novel functional differentiation method was proposed. Firstly, based on the functional description, the target circuit was converted to a new form with electronic cell as basic node through front synthesis, logic optimization, logical mapping and packing. Then, the circuit was mapped into embryonics array, and the function and connection of each electronic cell were determined through physical mapping process. At last, the genome was generated and the expressed gene of each electronic cell was confirmed with the genome generated process, and the functional differentiation of embryonics array was completed. The new functional differentiation method does not require the functional evaluation of each generation circuit, and the computational cost is reduced, the calculation speed is improved. The presented method provides a design method for the self-repair circuit application based on LUT-based embryonics array. The functional differentiation is described with an example, and the differentiation speed is verified through various circuits' functional differentiation.

Key words: embryonics array; electronic cell; functional differentiation; physical mapping; self-repair capacity

1 引言

随着电子系统规模及应用范围的不断扩展, 特别是航空、航天等特殊应用场合及复杂电磁环境下, 电子系统的高可靠性显得尤为重要. 胚胎电子电路 (embryological electronics, embryonics) 的提出, 为设计高可靠性的电子系统提供了新的途径.

经过二十多年的研究, 研究者提出了一系列的胚胎电子系统, 如 POEtic 系统^[1]、SABRE 系统^[2]、eTissue^[3] 等, 进行了语音处理^[4]、机器人控制器^[5]、滤波器^[6]及其他电路^[7]的初步应用.

胚胎电子阵列是胚胎电子电路的主要组成部分, 其上执行应用电路功能. 胚胎电子系统实现具体应用时, 如何对胚胎电子阵列进行功能分化, 确定阵列中电子细胞的表达基因, 是关系大规模胚胎电子阵列研究及实际应用的关键问题.

电子细胞的功能单元可由多路选择器 (Multiplexer, MUX) 或查找表 (Look-Up Table, LUT) 实现, 胚胎电子阵列依此可分为 MUX 型和 LUT 型胚胎电子阵列. 研究者采用有序二叉决策图进行 MUX 型胚胎电子阵列的功能分化^[8], 该方法不能充分利用 LUT 的丰富功能, 不适用于 LUT 型胚胎电子阵列. 对于 LUT 型胚胎电子阵列, 研究

者将基因调整网络用于其功能分化^[9],生物界中每种生物的基因调整网络具有很大差异,其机理尚在研究之中,如何针对特定的目标电路设计基因调控网络,具有一定难度,且功能分化中,需要评估每一代电路功能,对于大规模电路,特别是时序电路,功能评估计算量巨大,功能分化过程耗时严重。

本文提出了一种 LUT 型胚胎电子阵列的功能分化方法,通过前端综合、逻辑优化、逻辑映射、打包、物理综合、基因库生成等操作,根据目标电路的功能描述快速完成 LUT 型胚胎电子阵列的功能分化.该功能分化方法能够充分利用电子细胞的功能,无需进行电路功能评估,大大减少了分化过程的计算量,提高了功能分化速度。

2 胚胎电子阵列

2.1 胚胎电子阵列基础知识

胚胎电子阵列是由内部结构相同的电子细胞排列而成的均匀二维阵列,是一种具有自检测、自修复和自复制能力的生物启发式仿生硬件,其结构如图 1 所示。

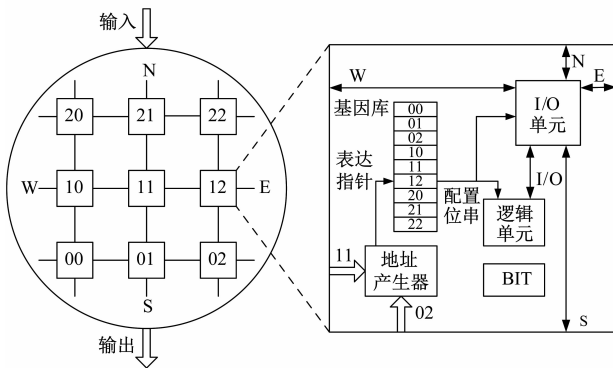


图1 胚胎电子阵列基本结构

电子细胞是具有一定数据处理能力的逻辑单元,由地址产生器、基因库、I/O单元、逻辑单元和 BIT 组成.地址产生器计算细胞在电路中的位置,产生细胞标识,通过该标识表达对应基因;基因库用来存储整个电路的所有基因,不同的基因具有不同的电路功能及连接方式;I/O单元进行细胞与周围细胞的信息交互;逻辑单元执行细胞的逻辑功能,在不同的基因配置下执行不同的逻辑功能;BIT在细胞运行过程中实时检测细胞状态。

通过功能分化,生成胚胎电子阵列上目标电路的基因库,细胞根据位置信息表达基因库中的特定基因,确定 I/O 连接及逻辑单元功能,所有细胞配合完成目标电路功能.运行过程中,细胞的 BIT 模块实时检测细胞状态,检测到细胞故障时,对外发出“故障”信号触发修复过程:移除故障细胞,剩余细胞重新计算位置信息并

以此更新表达基因,代替被移除细胞完成其功能,维持原阵列功能,完成电路自修复。

2.2 具有多种连接方式的胚胎电子阵列

具有多种连接方式的胚胎电子阵列^[10]根据阵列中细胞间的位置关系,将细胞间的连接分为局部连接和远程连接.局部连接通过导线将相邻的细胞连接在一起,完成相邻细胞间的信息交互;远程连接通过每个细胞内的开关盒和细胞间的导线相配合,完成不相邻细胞间的信号传输.具有多种连接方式的胚胎电子阵列结构如图 2 所示。

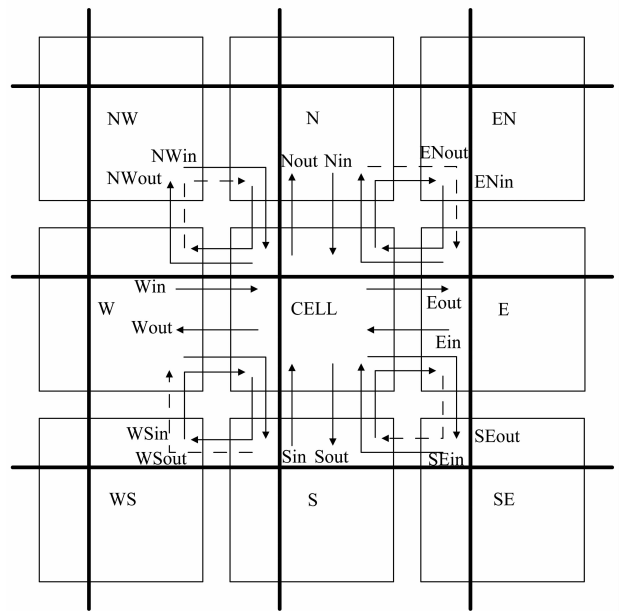


图2 具有多种连接方式的胚胎电子阵列结构

图 2 中以中间细胞 CELL 为例,其与周围的 8 个相邻细胞 S、SE、E、EN、N、NW、W、WS 通过细胞间的局部连接通道直接连接.图 2 中黑线所示为远程模式连接线,连接线在细胞内的交汇处为开关盒,通过开关盒的配合,实现不相邻细胞间的信号传输。

细胞的逻辑单元由一个 4 输入 LUT 和一个触发器 (Flip-Flop, FF) 组成,通过表达不同的基因,细胞能够实现任意输入不大于 4 的逻辑功能或具有一个延时的时序电路。

胚胎电子阵列的基因长度为 57 位,其中 16 位控制 4 输入 LUT 的功能,1 位控制是否延时,16 位控制 LUT 输入端的连接,24 位控制开关盒.基因具体配置如表 1 所示.其中 I1、I2、I3、I4 为 LUT 输入端,W1、W0、N1、N0、E1、E0、S1、S0 为开关盒连接端。

本文所提出的功能分化方法以具有多种连接方式的胚胎电子阵列为硬件基础进行试验、分析,通过功能分化,将阵列分化为具有自修复能力和预定功能的目标电路。

表 1 电子细胞基因功能配置

基因	56-54	53-51	50-48	47-45	44-42	41-39	38-36	35-33	32-29	28-25	24-21	20-17	16	15-0
功能	开关盒配置								LUT 输入连接选择配置				延时	LUT
	W1	W0	N1	N0	E1	E0	S1	S0	I4	I3	I2	I1	控制	功能配置

3 功能分化过程

以目标电路的功能描述及胚胎电子阵列结构描述为基础,以胚胎电子阵列上目标电路的自修复实现为目标,通过功能分化过程,可以获得胚胎电子阵列上对应目标电路的基因库,并确定阵列中每个细胞的表达基因。

所提出的 LUT 型胚胎电子阵列的功能分化过程分为前端综合、逻辑优化映射、打包、物理映射和基因库生成五个步骤,如图 3 所示。

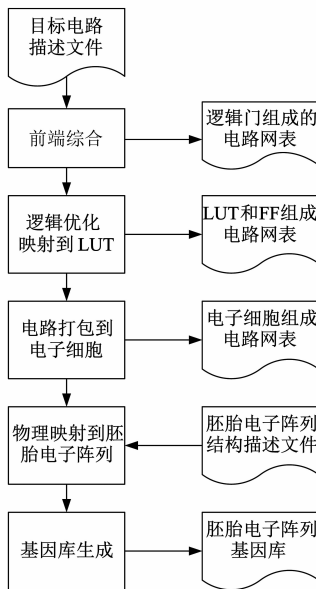


图3 功能分化过程

前端综合解析目标电路描述文件,将 Verilog 等描述语言描述的目标电路解析为由基本逻辑门构成的电路网表;

逻辑优化映射完成由逻辑门组成的电路网表的优化,并将优化后的电路网表映射为由 LUT 和 FF 为基本组成单元的电路网表;

打包将电路网表中的 LUT 和 FF 打包为胚胎电子阵列中的电子细胞,将电子细胞作为电路网表的基本组成单元,生成以胚胎电子阵列中电子细胞为基本节点的电路形式;

物理映射将由电子细胞组成的电路映射到胚胎电子阵列,确定电路中的各节点在胚胎电子阵列中的位置及节点间连接的具体实现路径;

基因库生成在物理映射的基础上,结合胚胎电子

阵列基因功能配置,生成目标电路的基因库,并确定阵列中每个电子细胞的表达基因。

通过前端综合、逻辑优化、逻辑映射、打包、物理映射、基因库生成等操作,以完成目标电路预定功能为目标,在胚胎电子阵列结构描述的基础上,确定胚胎电子阵列上目标电路的基因库及每个细胞表达基因,完成胚胎电子阵列的功能分化。

该功能分化过程中的前端综合、逻辑优化、打包可以采用已有工具完成,在此不再赘述,重点对物理映射过程进行研究。

4 物理映射过程建模

物理映射完成由以电子细胞为基本单元的电路网表到胚胎电子阵列具体实现的映射,即确定电路中各个节点及节点间的连接在胚胎电子阵列上的具体实现,最终确定胚胎电子阵列中每个电子细胞的功能及连接,为胚胎电子阵列的基因库生成做基础。

4.1 物理映射问题分析

物理映射是功能分化过程中的关键环节,主要完成以下三个任务:

- (1) 目标电路中的每个节点由阵列中的哪个细胞实现;
- (2) 电路的各个输入由阵列中哪个输入端口实现;
- (3) 节点间的连接在阵列上的实现路径。

胚胎电子阵列功能分化的目的是为了电路的自修复,对于同一目标电路,在物理映射过程中,存在多种实现形式,不同的实现形式具有不同的自修复能力,为了目标电路的自修复,最终映射结果应选择具有最大自修复能力的电路形式。

物理映射的本质为:在胚胎电子阵列上,利用阵列内的电子细胞及细胞间的连线资源,实现电路的节点及节点间的连接,并使电路的自修复能力最大。

物理映射过程中,三个任务依次进行:首先确定电路节点在胚胎电子阵列上的放置;其次,确定电路输入端口在胚胎电子阵列上的具体实现;最后,进行节点间的布线。

4.2 电路节点放置

胚胎电子阵列中的每个电子细胞都具有执行电路任何节点功能的能力,即可以选择胚胎电子阵列中的任意电子细胞放置目标电路的节点.在电路节点放置过程中,应尽量将具有连接关系的电路节点选择为相

邻细胞,使电路节点间连接路径尽量降低以减少阵列中开关盒负荷,使得阵列中布线资源得到充分利用。

在以上分析的基础上,对胚胎电子阵列及以电子细胞为基本节点的目标电路网表进行数学描述,并建立节点连接代价:

对于由 m 个细胞组成的胚胎电子阵列,细胞间的连接代价矩阵记为 $\mathbf{E} = [e_{ij}]_{m \times m}$,其中 $e_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 代表胚胎电子阵列中第 i 个细胞与第 j 个细胞的连接代价,用电子细胞在阵列中的距离表示,设两个电子细胞在阵列中的坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,则其连接代价 $e = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$;

对于具有 n 个节点的电路,其电路连接图的矩阵表示为 $\mathbf{C} = [c_{ij}]_{n \times n}$,其中 $c_{ij} \in \{0, 1\}$, $c_{ij} = 1$ 时,表示电路中第 i 个节点与第 j 个节点存在连接,且第 j 个节点的输出为第 i 个节点的输入; $c_{ij} = 0$ 时,表示电路中第 i 个节点与第 j 个节点不存在连接;

定义二值选择矩阵 $\mathbf{X} = [x_{ij}]_{m \times n}$,其中 $x_{ij} \in \{0, 1\}$,且 $\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1$,即 \mathbf{X} 中每列有且只有一个元素的值为 1,其余全部为 0。 x_{ij} 表示电路中节点在胚胎电子阵列中的位置选择: $x_{ij} = 1$ 时,表示电路中的第 j 个节点由胚胎电子阵列中的第 i 个细胞实现; $x_{ij} = 0$ 时,表示电路中的第 j 个节点与胚胎电子阵列中的第 i 个细胞无关;

在胚胎电子阵列上实现目标电路时,胚胎电子阵列的连接代价矩阵 \mathbf{E} 、电路连接矩阵 \mathbf{C} 是已知的,对于给定的选择矩阵 \mathbf{X} ,电路节点在阵列上的实现位置确定,节点间距离也随之确定,使用所有节点间连接代价之和作为电路在选择矩阵 \mathbf{X} 实现形式下的连接代价。电路的节点连接代价矩阵为

$$\mathbf{D}_X = ((\mathbf{E} * \mathbf{X})^T * \mathbf{X})^T * \mathbf{C} \quad (1)$$

节点连接代价矩阵记为 $\mathbf{D}_X = [d_{ij}]_{n \times n}$,则选择 X 下的节点连接代价为

$$J_X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (2)$$

4.3 电路输入端口放置

功能分化过程中,除了电路节点位置影响连接代价外,输入端口的的位置,对整个电路的实现,也有很大影响。胚胎电子阵列具有多个输入端口,选择不同的端口作为电路的输入端口,直接影响电路的布线复杂度和整个电路的自修复能力。为了对输入端口进行优选,首先对该问题进行分析建模。

首先对胚胎电子阵列的输入端口和细胞间的连接进行描述,定义连接代价矩阵 $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{m \times p}$,其中 p 为胚胎电子阵列中输入端口数目。 $r_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots\}$,代表第 j 个输入端口到第 i 个细胞的连接代价,其计算与细胞间连接代价相同;

定义电路的输入信息描述矩阵 $\mathbf{S} = [s_{ij}]_{n \times q}$,其中 q 为电路输入数目, $s_{ij} \in \{0, 1\}$,表示电路中第 i 个节点与第 j 个输入的连接关系: $s_{ij} = 1$ 时,电路中第 j 个输入是第 i 个节点的输入; $s_{ij} = 0$ 时,电路中第 j 个输入与第 i 个节点不存在连接关系;

定义二值选择矩阵 $\mathbf{Y} = [y_{ij}]_{p \times q}$,其中 $y_{ij} \in \{0, 1\}$,表示是否选择胚胎电子阵列中的第 i 个输入端口作为电路的第 j 个输入,且 $\sum_{i=1}^p y_{ij} = 1$, $\sum_{j=1}^q y_{ij} \leq 1$,即每列中有且只有一个元素为 1,每行中最多只有一个元素为 1,在所有的输入端口中,能且只能选择一个输入端口作为电路的第 i 个输入,且每个输入端口只能被选择一次: $y_{ij} = 1$ 表示选择胚胎电子阵列中的第 i 个输入端口作为电路中第 j 个输入; $y_{ij} = 0$ 表示不选择第 i 个输入端口作为电路的第 j 个输入。

胚胎电子阵列的输入端连接矩阵 \mathbf{R} 、电路输入信息描述矩阵 \mathbf{S} 已知,在节点选择矩阵 \mathbf{X} 下,对于输入端口选择矩阵 \mathbf{Y} ,电路在阵列中节点、输入位置确定,电路中输入与节点间距离确定,使用电路中所有输入与节点间距离之和作为连接代价,对应的输入连接代价矩阵为

$$\mathbf{D}_Y = (\mathbf{R}^T * \mathbf{X})^T * \mathbf{Y} * \mathbf{S} \quad (3)$$

输入连接代价矩阵记为 $\mathbf{D}_Y = [d_{ij}]_{n \times q}$,则在电子细胞选择矩阵 \mathbf{X} 、输入端口选择矩阵 \mathbf{Y} 下的输入连接代价为

$$J_Y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q d_{ij} \quad (4)$$

4.4 电路的自修复能力

电路的自修复能力(Self-Repair Capacity, SRC)表征电路从故障状态自动修复到正常状态的能力。电路的自修复能力越大,其从故障状态恢复到正常状态的次数越多。对于采用行/列移除自修复的胚胎电子系统,电路的自修复能力即为胚胎电子阵列中冗余行/列资源的数目。

胚胎电子阵列进行电路实现时,最根本的目的是电路自修复能力的最大化。对于具有 c 行 l 列电子细胞的胚胎电子阵列,设电子细胞状态矩阵为 $\mathbf{Z} = [z_{ij}]_{c \times l}$,其中 $z_{ij} = 0$ 表示 (i, j) 位置上的电子细胞不执行目标电路中的功能(处于空闲状态或输出传递状态), $z_{ij} = 1$ 表示 (i, j) 位置上的电子细胞为电路功能节点或节点间的连线,则电路的自修复能力为

$$\text{SRC} = l - \text{sum}((\mathbf{Z}^T * \mathbf{I}_{c \times 1}) \& \mathbf{I}_{l \times 1}) \quad (5)$$

其中 $\mathbf{I}_{c \times 1}$ 为 c 行 1 列的全 1 矩阵, $\mathbf{I}_{l \times 1}$ 为 l 行 1 列的全 1 矩阵, $\&$ 为逻辑乘,对于两元素 x, y ,有

$$x \& y = \begin{cases} 0, & x = 0 \text{ or } y = 0 \\ 1, & \text{other} \end{cases}$$

$\text{sum}(\cdot)$ 为行向量元素求和函数, 对于行向量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 有

$$\text{sum}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n x_i$$

4.5 物理映射过程的数学描述

在 4.2、4.3、4.4 节描述的基础上, 胚胎电路的物理映射过程即为在细胞连接代价矩阵 \mathbf{E} 、输入矩阵 \mathbf{R} 、目标电路连接矩阵 \mathbf{C} 、目标电路输入矩阵 \mathbf{S} 下, 确定细胞选择矩阵 \mathbf{X} 、输入端口选择矩阵 \mathbf{Y} , 在满足布线要求的情况下, 使电路连接代价 J_X 、 J_Y 较小, 电路的自修复能力 SRC 最大。

5 基于遗传算法的模型求解

物理映射过程是一个多目标优化过程, 可以采用多种优化方法求解, 本文使用较为成熟的遗传算法进行模型的求解。

5.1 遗传算法

遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法, 它借鉴了达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说, 是一种高效、并行、全局搜索的方法, 能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识, 并自适应地控制搜索过程以求得最优解。

遗传算法有选择、交叉和变异三个基本操作。选择操作从当前种群中选出优良个体, 使它们有机会作为父代繁殖下一代; 交叉是遗传算法中最重要的操作, 通过交叉可以得到新一代个体, 新个体组合了父辈个体的特性, 体现了信息交换的思想; 变异首先在种群内随机选择个体, 对于选中个体以一定的概率随机改变基因中某个编码的值, 为新个体的产生提供了机会。

通过选择、交叉、变异操作, 搜索空间内的较优解被逐渐积累起来, 并能够同时探索搜索空间内的其他位置, 增加了最优解求解的可能。

5.2 模型求解过程

以电子细胞选择矩阵 \mathbf{X} 、输入端口选择矩阵 \mathbf{Y} 为求解目标, 以节点连接代价 D_X 、输入连接代价 D_Y 和电路自修复能力 SRC 为适应度值, 使用遗传算法进行模型求解过程如图 4 所示。

选择矩阵 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 使用二进制编码进行编码, 对于每一代种群内的每个个体, 通过式(1)、式(2)计算电子细胞连接代价 J_X , 通过式(3)、式(4)计算输入连接代价 J_Y , 并根据所选择的电子细胞及输入端口进行胚胎电子阵列上目标电路的布线, 由布线后电子细胞使用情况计算电子细胞状态矩阵 \mathbf{Z} , 并由式(5)计算当前电路自修复能力 SRC。如果群体中所有个体均不满足最优解条件, 则通过选择、交叉、变异操作生成下一代种群, 重新进行计算。

求解过程中, 个体适应度 Fitness 通过电子细胞连

接代价、输入连接代价和自修复能力共同确定

$$\text{Fitness} = \frac{J_X + J_Y}{\text{SRC} + 1} \quad (6)$$

计算过程中, 由于自修复能力的计算需要进行胚胎电子阵列的布线, 该过程较为耗时, 因此只对种群中连接代价较小的个体进行自修复能力的计算, 其它个体的自修复能力默认为 0。

求解中的胚胎电子阵列布线过程使用基于协商的性能驱动布线算法 PathFinder 进行电子细胞间的布线, 在此不再赘述。

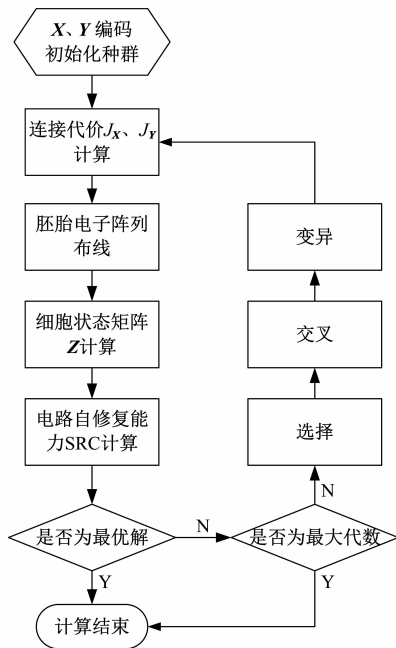


图4 基于遗传算法的模型求解过程

6 实验验证与分析

为了验证所提出的功能分化方法, 首先以雷达中的某电路为例, 对功能分化过程进行了详细说明; 然后以 LGSynth91 中的多个基准电路为目标电路, 对该方法的分化速度进行验证、分析。实验过程中, 采用 2.2 节所述具有多种连接方式的胚胎电子阵列为硬件平台。

6.1 功能分化算例

以雷达装备中某数字电路的自修复实现为例, 对所提出的功能分化方法的具体应用过程进行阐述, 实验中胚胎电子阵列规模设置为 3 行 4 列。

实验电路是具有 1 个时钟控制端、4 个信号输入端、1 个信号输出端的时序电路, 由 3 个 D 触发器、2 个反相器和 13 个门电路组成, 电路如图 5 所示。其中 in1、in2、in3、in4 为输入; clk 为时钟输入; out 为输出; FD 为 D 触发器。

首先对实验电路进行前端综合、逻辑优化、逻辑映射, 将电路转化为由 LUT 和 FF 为基本节点的电路网

表.使用 VTR^[11]中的 ODIN_II、ABC 工具进行解析、逻辑优化、逻辑映射后的电路结构如图 6 所示.

其中节点 n19、n17、n13、n18、n23、n25 为 LUT;节点 n40L、n41L、n42L 为 FF.各 LUT 节点的功能分别为:

$$\begin{aligned} n13: o &= (\overline{i1} * i2) + (i1 * \overline{i3} * i2) + (i3 * i2) \\ n18: o &= i1 * \overline{i2} \\ n23: o &= (\overline{i1} * i2) + i3 \\ n25: o &= (\overline{i1} * \overline{i2} * i3) + (\overline{i2} * i4) \\ n19: o &= (i1 * \overline{i2}) + (\overline{i2} * \overline{i3} * i4) + (\overline{i2} * i3 * \overline{i4}) \\ n17: o &= \overline{i1} * i2 * \overline{i3} * \overline{i4} \end{aligned}$$

式中 $i_1、i_2、i_3、i_4$ 分别为各 LUT 的输入信号, o 为 LUT 输出值.

经过打包,n19、n17、n25 分别由单独的一个细胞实现,n13 和 n40L 由一个细胞实现;n18 和 n41L 由一个细胞实现;n23 和 n42L 由一个细胞实现;在电路节点间关系描述时,不再单独对 n40L、n41L、n42L 节点进行描述.

按照 4.2、4.3 节所述对胚胎电子阵列和实验电路进行数学描述,2.2 节所述胚胎电子阵列的相邻细胞间可以通过局部连接直接进行信息交互,其连接代价为 0,则其细胞间连接矩阵为

$$E = \begin{matrix} & \begin{matrix} (0,0) & (0,1) & (0,2) & (0,3) & (1,0) & (1,1) & (1,2) & (1,3) & (2,0) & (2,1) & (2,2) & (2,3) \end{matrix} \\ \begin{matrix} (0,0): \\ (0,1): \\ (0,2): \\ (0,3): \\ (1,0): \\ (1,1): \\ (1,2): \\ (1,3): \\ (2,0): \\ (2,1): \\ (2,2): \\ (2,3): \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 3 & 4 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 4 & 3 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 4 & 3 & 0 & 0 & 5 & 4 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & 4 & 0 & 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 4 & 3 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 0 & 0 & 3 & 4 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 4 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 4 & 3 & 2 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 4 & 3 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中(0,0)、(2,3)等表示胚胎电子阵列中相应位置上的电子细胞.

实验电路的节点间连接矩阵为

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} n17 & n25 & n13 & n18 & n23 & n19 \end{matrix} \\ \begin{matrix} n17: \\ n25: \\ n13: \\ n18: \\ n23: \\ n19: \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

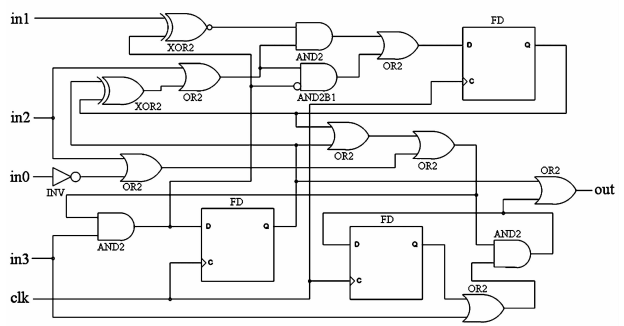


图5 实验电路图

其中 n17、n25、n19 为实验电路中的电路节点,n13、n18、n23 表示电路中的 n13、n18、n23 分别与 n40L、n41L、n42L 节点相结合后的电路节点,具有延时功能.

胚胎电子阵列的输入端与细胞间连接矩阵为

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0_1 & 0_2 & 0_3 & 0_4 & 0_5 & 1_1 & 1_2 & 1_3 & 1_4 & 1_5 & 2_1 & 2_2 & 2_3 & 2_4 & 2_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} (0,0): \\ (0,1): \\ (0,2): \\ (0,3): \\ (1,0): \\ (1,1): \\ (1,2): \\ (1,3): \\ (2,0): \\ (2,1): \\ (2,2): \\ (2,3): \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \infty & 0 & 1 & 1 & \infty & \infty & \infty & 2 & 2 & \infty & \infty & \infty \\ 1 & 1 & \infty & \infty & \infty & 2 & 2 & \infty & \infty & \infty & 3 & 3 & \infty & \infty & \infty \\ 2 & 2 & \infty & \infty & \infty & 3 & 3 & \infty & \infty & \infty & 4 & 4 & \infty & \infty & \infty \\ 3 & 3 & \infty & \infty & \infty & 4 & 4 & \infty & \infty & \infty & 5 & 5 & \infty & \infty & \infty \\ 1 & 1 & \infty & 0 & \infty & 0 & 0 & 0 & \infty & 0 & 1 & 1 & \infty & \infty & \infty \\ 2 & 2 & \infty & \infty & \infty & 1 & 1 & \infty & \infty & \infty & 2 & 2 & \infty & \infty & \infty \\ 3 & 3 & \infty & \infty & \infty & 2 & 2 & \infty & \infty & \infty & 3 & 3 & \infty & \infty & \infty \\ 4 & 4 & \infty & \infty & \infty & 3 & 3 & \infty & \infty & \infty & 4 & 4 & \infty & \infty & \infty \\ 2 & 2 & \infty & \infty & \infty & 1 & 1 & \infty & 0 & \infty & 0 & 0 & 0 & \infty & 0 \\ 3 & 3 & \infty & \infty & \infty & 2 & 2 & \infty & \infty & \infty & 1 & 1 & \infty & \infty & \infty \\ 4 & 4 & \infty & \infty & \infty & 3 & 3 & \infty & \infty & \infty & 2 & 2 & \infty & \infty & \infty \\ 5 & 5 & \infty & \infty & \infty & 4 & 4 & \infty & \infty & \infty & 3 & 3 & \infty & \infty & \infty \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中(0,0)、(0,1)、...、(2,3)等表示胚胎电子阵列中相应位置上的电子细胞;0₁、0₂、...、2₅等为胚胎电子阵列的输入端,阵列中的每行电子细胞有 5 个输入端,分别由 *₁ ~ *₅ 表示,其中 * 代表输入端所在行数,*₁、*₂ 接至远程连接的开关盒,*₃、*₄、*₅ 直接连接电子细胞,为细胞的 Win、W2S_W(下方电子细胞的 NWin 端)、WSin 输入端.远程连接输入端可连接到胚胎电子阵列中的任一细胞,局部连接输入端只能连接到其相邻的特定电子细胞,与不相邻的电子细胞间的连接代价为 ∞.

实验电路的输入与节点连接矩阵为

$$S = \begin{matrix} & \begin{matrix} in0 & in1 & in2 & in3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} n17: \\ n25: \\ n13: \\ n18: \\ n23: \\ n19: \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中 in0、in1、in2、in3 为实验电路的输入端.

在以上描述的基础上,使用 5.2 节所述求解方法进行求解.求解过程中,使用 44 位编码,其中电子细胞选择矩阵 X 编码长度为 24 位,输入端口选择矩阵 Y 编码长度为 20 位.求解过程中,种群规模设置为 100,最大遗传代数为 500,代沟为 0.9,重组概率为 0.8,变异概率为 0.1.在该设置下,求解过程中节点连接代价、输入连接代价及电路的自修复能力变化如图 7 所示.为了进行遗传操作,计算过程中对节点连接代价和输入连接代价进行了归一化操作,图 7 中所示节点连接代价和输入连接代价为归一化处理后结果.

求解所得的电子细胞选择矩阵 X 为

$$X = \begin{matrix} & n17 & n25 & n13 & n18 & n23 & n19 \\ (0,0): & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ (0,1): & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (0,2): & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (0,3): & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1,0): & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ (1,1): & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1,2): & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1,3): & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (2,0): & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ (2,1): & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ (2,2): & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (2,3): & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

即电路中的 n17、n25、n13、n18、n23 和 n19 节点分别由胚胎电子阵列中(1,1)、(0,1)、(1,0)、(2,1)、(0,0)和(2,0)位置的电子细胞实现.

输入端口选择矩阵 Y 为

$$Y = \begin{matrix} & in0 & in1 & in2 & in3 \\ 1_1: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1_2: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1_3: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1_4: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1_5: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2_1: & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2_2: & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2_3: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2_4: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2_5: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3_1: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3_2: & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3_3: & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3_4: & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3_5: & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

即电路的输入 in0、in1、in2、in3 分别由胚胎电子阵列中的 2_2、3_3、3_2、2_1 输入端口实现.

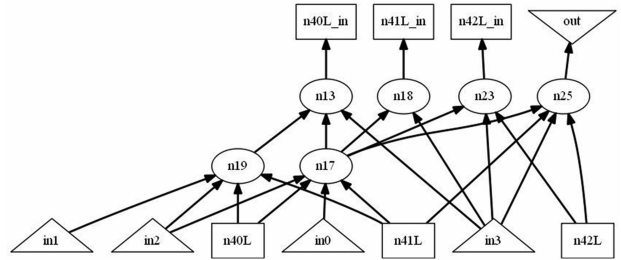


图6 LUT和FF为节点的电路结构

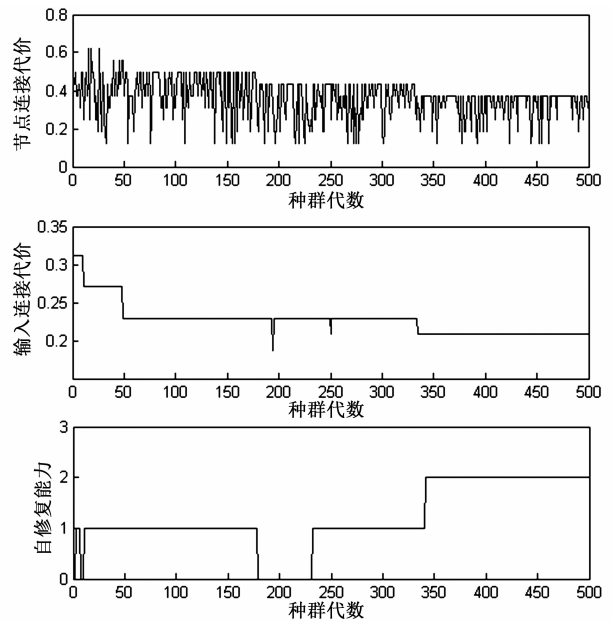


图7 求解过程中 J_x 、 J_y 、SRC的变化

映射到胚胎电子阵列上的实验电路如图 8 所示.图 8 中黑线为电路中信号传输路径,细胞上标识为细胞所实现的功能.由图 8 可以看出,阵列中具有两列冗余电子细胞,当电路节点故障时,可以通过列移除操作完成电路的自修复,两列冗余电子细胞支持两次自修复,电路的自修复能力 SRC 为 2.

物理映射完成后,可以确定胚胎电子阵列中每个电子细胞的功能及连接,根据表 1 所示电子细胞基因功能配置,可以确定每个细胞的表达基因,如表 2 所示,所有表达基因的集合即为胚胎电子阵列的基因库,胚胎电子阵列的功能分化完成.

6.2 功能分化时间分析

在 Microsoft Visual Studio 2010 环境下使用 C++ 语言对所提功能分化方法进行了实现,对 6.1 节实验电路(记为 radcir)和 LGSynth91 中多个电路进行了功能分化

由表3所示分化时间可以看出,本文方法对于小规模电路分化速度快,对于中规模电路,其分化时间也能够满足实际需求.

由于已有的方法能够适用的电路规模较小,对于本实验中电路采用已有方法进行分化十分耗时,且多数无法完成分化,因此本文方法没有与已有方法进行时间对比.

7 总结与展望

本文提出一种用于 LUT 型胚胎电子阵列的功能分化方法,该方法在目标电路的功能描述及胚胎电子阵列的结构描述的基础上,可以快速进行 LUT 型胚胎电子阵列的功能分化,达到目标电路的自修复实现目的.所提出的功能分化方法为基于 LUT 型胚胎电子阵列的自修复电路实现提供了设计方法,为 LUT 型胚胎电子阵列的实际应用提供了支持.

所提出的功能分化方法可用于任意结构的 LUT 型胚胎电子阵列,即对 LUT 型胚胎电子阵列具有普适性.对于其它结构的 LUT 型胚胎电子阵列,根据 4.2、4.3 节方法确定对应的细胞间连接代价矩阵 E 、输入端口和细胞间连接代价矩阵 R ,通过本文所建模型及求解方法,可以完成其功能分化.

本文对功能分化过程中的物理映射过程进行了分析、建模和求解.通过其模型可以看出,物理映射是一个多目标优化过程,且多个目标间存在一定关系.本文简单的将多目标转化为单一目标进行处理,未对多目标及多目标间的关系进行详细的分析.下一步研究中,将根据模型中的多目标及目标间的关系进行求解过程的优化,提高物理映射的速度,进一步的提高胚胎电子阵列功能分化的速度.

参考文献

- [1] Y Thoma, G Tempesti, E Sanchez, et al. POETic: an electronic tissue for bio-inspired cellular applications [J]. *BioSystem*, 2004, 76(1): 191 – 200.
- [2] Y Liu, P Bremner, M Samie, et al. SABRE: a bio-inspired fault-tolerant electronic architecture [J]. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2013, 8(1): 1 – 16.
- [3] 徐佳庆, 窦勇, 吕启, 等. 电子组织: 一种具有自适应能力的可重构仿生硬件结构[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(9): 2005 – 2017.
Xu Jiaqing, Dou Yong, Lü Qi, et al. eTissue: an adaptive reconfigurable bio-inspired hardware architecture[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 49(9): 2005 – 2017. (in Chinese)
- [4] W Barker, D M Halliday, Y Thoma, et al. Fault tolerance using dynamic reconfiguration on the POETic tissue[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(5): 666 – 684.
- [5] G Dragffy, M Samie, A M Tyrrell, et al. Novel bio-inspired approach for fault-tolerant VLSI systems[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2013, 21(10): 1878 – 1891.
- [6] 王南天, 钱彦岭, 李岳, 等. 胚胎型在线自修复 FIR 滤波器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(6): 1385 – 1391.
Wang Nantian, Qian Yanling, Li Yue, et al. Study of embryonic type on-line self-healing FIR filters[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(6): 1385 – 1391. (in Chinese)
- [7] 郝国锋, 等. 可重构硬件芯片级故障定位与自主修复方法[J]. *电子学报*, 2012, 40(2): 384 – 388.
HAO Guo-feng, et al. In-chip fault localization and self-repairing method for reconfigurable hardware [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(2): 384 – 388. (in Chinese)
- [8] M Samie, E Farjah, G Dragffy. Cyclic metamorphic memory for cellular bio-inspired electronic systems [J]. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2008, 9(3): 183 – 201.
- [9] S Zhan, J F Miller, A M Tyrrell. Modular design from gene regulation in a cellular system [A]. *Proceedings of 6th IEEE World Congress on Computational Intelligence [C]*. Barcelona: IEEE Computer Society, 2010. 1 – 8.
- [10] S Zhu, J Y Cai, Y F Meng, et al. A novel structure of embryonics electronic cell array [J]. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 2014, 13(2014): 224 – 232.
- [11] J Luu, J Goeders, M Wainberg, et al. VIR 7.0: next generation architecture and CAD system for FPGAs [J]. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*, 2014, 7(2): 6:1 – 6:30.

作者简介

朱 赛 男, 1987 年 8 月出生, 河南周口人. 军械工程学院博士研究生, 研究方向为仿生电子系统设计及电子系统自修复设计.

E-mail: szhumail@163.com

蔡金燕 女, 1961 年 12 月出生, 天津武清人. 军械工程学院教授、博士生导师, 研究方向为电子系统可靠性分析与设计、电子系统仿生自修复设计等.

E-mail: radarc@126.com

孟亚峰(通信作者) 男, 1970 年 12 月出生, 河北石家庄市人, 军械工程学院副教授, 研究方向为电子系统可靠性分析与设计、电子系统仿生自修复设计等.

E-mail: radarm@126.com