



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105306075 B

(45)授权公告日 2017.09.29

(21)申请号 201510532191.0

(22)申请日 2015.08.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105306075 A

(43)申请公布日 2016.02.03

(73)专利权人 宁波大学

地址 315211 浙江省宁波市江北区风华路818号

(72)发明人 厉康平 汪鹏君 张会红

(74)专利代理机构 宁波奥圣专利代理事务所

(普通合伙) 33226

代理人 方小惠

(51)Int. Cl.

H03M 13/13(2006.01)

(56)对比文件

CN 1450627 A, 2003.10.22,

CN 102982205 A, 2013.03.20,

孙飞. 三值FPRM逻辑电路面积最佳极性搜

索.《中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑》.2015,第2015年卷(第3期),

Fei Sun等. Best polarity searching for ternary FPRM logic circuit area based on whole annealing genetic algorithm.《IEEE, International Conference on Asic》.2014,

汪鹏君等. 基于整体退火遗传算法的低功耗最佳极性搜索.《计算机辅助设计与图形学报》.2008,第20卷(第1期),

张会红. 基于XNOR/OR的FPRM极性优化研究.《中国博士学位论文全文数据库信息科技辑》.2011,第2011年卷(第07期),

孙飞等. 基于遗传算法的三值FPRM电路面积优化.《山东大学学报(理学版)》.2013,第48卷(第5期),

Jing Dai等. A Novel Quantum Genetic Algorithm for Area Optimization of FPRM Circuits.《IEEE Computer Society》.2009,

审查员 张颖

权利要求书4页 说明书13页

(54)发明名称

一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法

(57)摘要

本发明公开了一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法,首先将三值FPRM电路采用p极性下的三值FPRM逻辑函数进行表示,然后分解三值FPRM逻辑函数中含有的多输入运算,得到p极性下的多个二输入模3加门和多个二输入模3乘门,将二输入模3加门和二输入模3乘门引起的功耗作为p极性下的三值FPRM电路的功耗,构建得到三值FPRM电路的功耗估计模型,最后采用模拟退火遗传算法对三值FPRM电路进行功耗最佳极性搜索,得到功耗最佳极性搜索及最小功耗;优点是实现三值FPRM电路功耗最佳极性搜索,从而实现三值FPRM电路功耗优化;随机采用13个MCNC Benchmark电路进行仿真验证,本发明搜索到的功耗最佳极性与0极性比较,模3加门数量平均节省57.64%,模3乘门数量平均节省46.25%,功耗

平均节省73.98%。

1. 一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法,其特征在于包括以下步骤:

①建立三值FPRM电路的功耗估计模型:

①-1将三值FPRM电路采用三值FPRM逻辑函数表示为如下形式:

$$f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0) = \oplus \sum_{i=0}^{3^n-1} a_i * \prod_{j=0}^{n-1} \dot{x}_j^i \quad (1)$$

其中, n 为函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的输入变量数量, $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0$ 表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的 n 个输入变量, p 表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的极性, 极性 p 用三进制形式表示为 $p_{n-1}p_{n-2}\dots p_0$, $p_j \in \{0, 1, 2\}$, $j=0, 1, 2, \dots, n-1$, \oplus 表示模3加运算, Σ 为累加符号, 符号“*”为乘运算符, 下标 $i=0, 1, 2, \dots, 3^n-1$, i 用三进制形式表示为 $i_{n-1}i_{n-2}\dots i_0$, a_i 为FPRM系数;

$a_i \in \{0, 1, 2\}$; Π 表示模3乘运算, $\prod_{j=0}^{n-1} \dot{x}_j^i$ 的其展开式为: $\prod_{j=0}^{n-1} \dot{x}_j^i = \dot{x}_{n-1}^{i_{n-1}} \dot{x}_{n-2}^{i_{n-2}} \dots \dot{x}_0^{i_0}$, 其中 $i_j \in \{0, 1, 2\}$, $\dot{x}_j = (x_j \oplus p_j)$, $\dot{x}_j^0 = 1$, $\dot{x}_j^1 = \dot{x}_j$, $\dot{x}_j^2 = \dot{x}_j * \dot{x}_j$, 极性 p 和下标 i 决定变量 \dot{x}_j 的表示形式;

①-2 p 极性下的三值FPRM逻辑函数包含两类多输入运算, 两类多输入运算分别为多输入模3加运算和多输入模3乘运算, 根据三值FPRM逻辑函数展开式将三值FPRM逻辑函数分解为多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算, 然后将每个多输入运算分别分解为二输入运算, 得到二输入模3加运算和二输入模3乘运算, 具体分解过程为:

将多输入运算的第1个输入变量和第2个输入变量作为第一个二输入运算的两个输入变量, 得到第一个二输入运算的输出变量; 将第一个二输入运算的输出变量和多输入运算的第3个输入变量作为第二个二输入运算的两个输入变量, 得到第二个二输入运算的输出变量; 将第二个二输入运算的输出变量和多输入运算的第4个输入变量作为第三个二输入运算的两个输入变量, 得到第三个二输入运算的输出变量; 依此类推, 直到所有的多输入运算的输入变量作为二输入运算的输入变量, 完成多输入运算的分解;

将 p 极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算, 多输入模3加运算也称为多输入模3加门, 多输入模3乘运算也称为多输入模3乘门, 将 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量记为 N , 将 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量记为 W ; 将每个多输入模3加运算分解后得到多个二输入模3加运算, 将每个多输入模3乘运算分解后得到多个二输入模3乘运算, 二输入模3加运算也称为二输入模3加门, 二输入模3乘运算也称为二输入模3乘门; 将第 H 个多输入模3加门分解后的二输入模3加门的数量记为 N_H , $H=1, 2, \dots, N$; 将第 o 个多输入模3乘门分解后的二输入模3乘门的数量记为 W_o , $o=1, 2, \dots, W$;

①-3将 p 极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到的所有二输入模3加门和二输入模3乘门引起的功耗作为 p 极性下的三值FPRM电路的功耗, 二输入模3加门引起的功耗采用其开关活动性表示, 二输入模3乘门引起的功耗采用其开关活动性表示, 门电路的开关活动性用其输出端的输出变量概率表示, 二输入模3加门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示, 二输入模3乘门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示;

①-4根据公式(2)、(3)和(4)计算第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门的输出变量概率; $k=1, 2, \dots, N_H$;

$$P_1(k)_H = P_{k_y11} * P_{k_y20} + P_{k_y10} * P_{k_y21} + P_{k_y12} * P_{k_y22} \quad (2)$$

$$P_2(k)_H = P_{k_{y12}} * P_{k_{y20}} + P_{k_{y11}} * P_{k_{y21}} + P_{k_{y10}} * P_{k_{y22}} \quad (3)$$

$$P_0(k)_H = 1 - P_1(k)_H - P_2(k)_H \quad (4)$$

根据公式(5)、(6)和(7)计算第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门的输出变量概率, $g=1,2,\dots,W_o$:

$$Q_1(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r21}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r22}} \quad (5)$$

$$Q_2(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r22}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r21}} \quad (6)$$

$$Q_0(g)_o = 1 - Q_1(g)_o - Q_2(g)_o \quad (7)$$

其中, $P_1(k)_H$ 表示第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门输出变量为1的概率, $P_2(k)_H$ 表示第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门输出变量为2的概率, $P_0(k)_H$ 表示第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门输出变量为0的概率, y_1 和 y_2 表示二输入模3加门的两个输入变量, $m \in \{0,1,2\}$,当 $k=1$ 时, $P_{k_{y1m}}$ 为多输入模3加运算的第1个输入变量为 m 的概率, $P_{k_{y2m}}$ 为多输入模3加运算的第2个输入变量为 m 的概率,当 $k>1$ 时, $P_{k_{y1m}}$ 为第 $k-1$ 个二输入模3加门输出变量为 m 的概率, $P_{k_{y2m}}$ 为多输入模3加门的第 $k+1$ 个输入变量为 m 的概率;

$Q_1(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为1的概率, $Q_2(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为2的概率, $Q_0(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为0的概率, r_1 和 r_2 表示二输入模3乘门的两个输入变量;当 $g=1$ 时, $Q_{g_{r1m}}$ 为多输入模3乘运算的第1个输入变量为 m 的概率, $Q_{g_{r2m}}$ 为多输入模3乘运算的第2个输入变量为 m 的概率,当 $g>1$ 时, $Q_{g_{r1m}}$ 为第 $g-1$ 个二输入模3乘门输出变量为 m 的概率, $Q_{g_{r2m}}$ 为多输入模3乘门的第 $g+1$ 个输入变量为 m 的概率;

输入变量 x_j 为1和2的概率是由随即函数产生的概率对 (P_1, P_2) , $P_0 = 1 - P_1 - P_2$; P_0, P_1 和 P_2 分别为0到1之间某个值, P_0 表示输入变量为0的概率, P_1 表示输入变量为1的概率, P_2 表示输入变量为2的概率;

①-5根据二输入模3加门的输出变量概率和二输入模3乘门的输出变量概率计算三值FPRM电路的功耗,将三值FPRM电路的功耗估计模型表示为:

$$E_{\text{swd}} = 2 \left(\sum_{H=1}^N \left(\sum_{k=1}^{N_H} (P_1(k)_H + P_2(k)_H) \right) + \sum_{o=1}^W \left(\sum_{g=1}^{W_o} (Q_1(g)_o + Q_2(g)_o) \right) \right) \quad (8)$$

其中, E_{swd} 表示 p 极性下三值FPRM电路的功耗, N 为 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量, W 为 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量;

②设定模拟退火遗传算法中用于计算个体适应度的适应度函数:

根据功耗估计模型,设定模拟退火遗传算法中计算个体适应度的适应度函数:在模拟退火遗传算法中,适应度越大表示个体的适应能力越强,但功耗最佳极性要求功耗越小越好,因此,为了便于两者结合,采用功耗的倒数表示适应度,得到适应度函数如下:

$$\text{fitness} = \alpha / E_{\text{swd}}$$

其中,符号“/”表示除运算符, fitness 表示个体的适应度大小; E_{swd} 表示电路功耗; α 为放大系数,取值为大于等于1000的自然数;

③建立三值FPRM电路和模拟退火遗传算法的对应关系:

模拟退火遗传算法包含以下几个关键要素:个体、个体的适应度、适应度最大的个体、

最大适应度、交叉操作、变异操作、退火选择操作；

三值FPRM电路功耗优化包含以下几个关键要素：极性、相应极性的功耗、最佳极性、最小功耗、极性交流、极性突变、极性变换；

将个体映射到三值FPRM电路功耗优化，表示为极性；将个体的适应度映射到三值FPRM电路功耗优化，表示为相应极性的功耗；将适应度最大的个体映射到三值FPRM电路功耗优化，表示为最佳极性；将最大适应度映射到三值FPRM电路功耗优化，表示为最小功耗；将交叉操作映射到三值FPRM电路功耗优化，表示为极性交流；将变异操作映射到三值FPRM电路功耗优化，表示为极性突变；将退火选择操作映射到三值FPRM电路功耗优化，表示为极性变换；

④设置模拟退火遗传算法相关参数：

模拟退火遗传算法需设置4个参数：个体规模 w 、个体迭代次数 z 、基因突变概率 q 、起始温度 T_0 ；令个体规模 $w=50$ 、个体迭代次数 $z=20$ 、基因突变概率 $q=0.01$ 、起始温度 $T_0=100$ ℃；

⑤采用模拟退火遗传算法得到适应度最大个体和最大适应度，适应度最大个体即为三值FPRM电路的功耗最佳极性；最大适应度即为三值FPRM电路的最小功耗。

2. 根据权利要求1所述的一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法，其特征在于所述的步骤⑤中采用模拟退火遗传算法得到适应度最大个体和最大适应度的具体过程为：

⑤-1用随机函数 $\text{rand}()$ 产生 w 个用 n 位三进制表示的个体，将 w 个个体分别记为 P_1, P_2, \dots, P_w ；

⑤-2通过适应度函数计算第 v 个个体 P_v 的适应度， $v=1, 2, 3, \dots, w$ ，得到个体 P_1, P_2, \dots, P_w 的适应度；

⑤-3比较个体 P_1, P_2, \dots, P_w 的适应度，筛选出适应度最大的个体作为适应度最大个体，记录适应度最大个体和最大适应度；

⑤-4对个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行交叉操作产生个体 F_1, F_2, \dots, F_w ：若 w 为偶数，将 P_1 和 P_2 、 P_3 和 P_4 、 \dots 、 P_{w-1} 和 P_w 两两分别进行交叉操作；若 w 为奇数，将 P_1 和 P_2 、 P_3 和 P_4 、 \dots 、 P_{w-2} 和 P_{w-1} 两两分别进行交叉操作， P_w 不参与交叉操作， F_w 直接继承 P_w ；两个个体 P_e 和 P_u 进行交叉操作产生个体 F_e 和 F_u ，具体过程为：将进行交叉操作的个体 P_e 赋值给 f_e ，个体 P_u 赋值给 f_u ，随机产生一个 n 位二进制码，将该 n 位二进制码记为 A ，根据二进制码 A 更新 f_e 和 f_u ，当二进制码 A 的第 h 位为1时， f_e 的第 h 位保持不变， f_u 的第 h 位保持不变；当二进制码 A 的第 h 位为0时， f_e 的第 h 位继承 f_u 的第 h 位， f_u 的第 h 位继承 f_e 的第 h 位， $h=1, 2, 3, \dots, n$ ，将交叉操作完成后的 f_e 记为 F_e ，交叉操作完成后的 f_u 记为 F_u ；其中 $u=e+1$ ，当 w 为偶数时， $e=1, 3, 5, \dots, w-1$ ； $u=2, 4, 6, \dots, w$ ；当 w 为奇数时， $e=1, 3, 5, \dots, w-2$ ； $u=2, 4, 6, \dots, w-1$ ；

⑤-5通过适应度函数计算第 v 个个体 F_v 的适应度，得到个体 F_1, F_2, \dots, F_w 的适应度；

⑤-6将个体 F_1, F_2, \dots, F_w 的适应度和目前适应度最大个体的适应度进行比较，更新适应度最大个体和最大适应度；

⑤-7将个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行变异操作：对 F_v 的每一位均用随机函数 $\text{rand}()$ 产生一个0到1之间的值，若这个值小于基因突变概率 q ，则这个值对应的位就是 F_v 的变异位，对 F_v 的变异位进行变异，变异规则为“0→1, 1→2, 2→0”；

⑤-8按照步骤⑤-5~⑤-6对个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行处理，得到更新后的适应度最大个

体和最大适应度；

⑤-9根据适应度值的大小对个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行排序,根据适应度值的大小对个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行排序;在个体 P_1, P_2, \dots, P_w 和个体 F_1, F_2, \dots, F_w 中各自选择适应度值最优的 $2w/3$ 个个体,组成一组新的个体,新的个体含有 $4w/3$ 个个体;

⑤-10对一组新的个体进行多轮退火选择:每一轮退火选择中,首先根据公式(9)产生一个退火温度,对于该退火温度,按公式(10)依次计算各个个体的被选取概率 $P(c)$,同时用随机函数 $\text{rand}()$ 产生一个筛选概率 $t, 0 < t < 1$;当个体的被选取概率大于筛选概率时,该个体在这一轮退火选择中被选择,被选择的个体不再参与下一轮退火选择,其他未被选择的个体进入下一轮退火选择,直到筛选出 w 个个体更新个体 P_1, P_2, \dots, P_w 后,退火选择结束;

$$T_l = 1 / \ln(1/T_0 + 1) \quad (9)$$

$$P(c) = e^{f(c)/T_l} / \sum_{d=0}^{4w/3} e^{f(d)/T_l} \quad (10)$$

其中, T_l 表示第 l 轮的退火温度, $l=1, 2, \dots$;第一轮退火选择时, $l=1$,第二轮退火选择时, $l=2$,以此类推; \ln 表示对数操作; T_0 表示初始温度; $P(c)$ 表示个体 c 的概率; $f(c)$ 表示新的个体中第 c 个个体的适应度值; $c=1, 2, 3, \dots, 4w/3$; $f(d)$ 表示新的个体中第 d 个个体的适应度值; $d=1, 2, 3, \dots, 4w/3$;

⑤-11按照步骤⑤-2~⑤-3对步骤⑤-10中更新后的个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行处理,得到适应度最大个体和最大适应度;

⑤-12重复步骤⑤-4~⑤-11,直到满足个体迭代次数 z ,算法结束,得到适应度最大个体和最大适应度;

⑤-13将最后一次得到的适应度最大个体和最大适应度输出,适应度最大个体即为三值FPRM电路的最佳极性;最大适应度即为三值FPRM电路的最小功耗。

一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种三值FPRM电路功耗优化方法,尤其是涉及一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法。

背景技术

[0002] 随着集成电路规模和集成度的不断发展,数字电路必定会遭遇功耗、面积与速度等问题。传统的数字电路大都采用二值逻辑,但是二值信号信息含量低已成为制约集成电路发展的主要因素。而多值逻辑电路增加了单线携带信息的能力,能有效提高空间或时间的利用率,减少数字系统的连线,节省电路面积与成本。基数为3的三值逻辑在多值逻辑代数系统中基数最小,容易实现,具有代表性。

[0003] 任意逻辑函数均可以用布尔逻辑和Reed-Muller (RM) 逻辑来表示,与传统的布尔逻辑电路相比,基于RM逻辑的电路具有以下三个方面的优势:首先,在某些功能电路(如通信电路、奇偶校验电路、运算电路等)中,用RM逻辑表示的电路在功耗、面积和速度等方面体现出了巨大的优势;其次,用RM逻辑表示的电路可测性强;最后,用RM逻辑表示的电路结构更加紧凑。RM逻辑函数通常采用固定极性(Fixed-polarity Reed-Muller, FPRM)和混合极性(Mixed-polarity Reed-Muller, MPRM)两种表达方式。在n变量的三值FPRM逻辑函数中有 3^n 个固定极性, 3^n 个固定极性和对应 3^n 个不同的三值FPRM表达式,三值FPRM表达式的简单与否由其对应的极性决定,而三值FPRM表达式的简单与否直接决定了三值FPRM电路的功耗和面积等性能指标,因此,极性对FPRM电路的功耗、面积等性能指标产生很大的影响。

[0004] 由于多值逻辑和RM逻辑的诸多优点,国内外许多专家学者对多值RM逻辑进行了研究。然而国内外专家学者主要集中研究多值RM逻辑电路极性转换技术,对于多值RM电路的功耗优化技术未进行研究。鉴此,基于模拟退火遗传算法,设计一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法来搜索三值FPRM电路的功耗最佳极性,对三值FPRM电路功耗优化具有重要意义。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是提供一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法。该方法可以快速搜索到功耗最佳极性,从而实现功耗的优化。

[0006] 本发明解决上述技术问题所采用的技术方案为:一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法,包括以下步骤:

[0007] ①建立三值FPRM电路的功耗估计模型:

[0008] ①-1将三值FPRM电路采用三值FPRM逻辑函数表示为如下形式:

$$[0009] \quad f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0) = \bigoplus_{i=0}^{3^n-1} a_i * \prod_{j=0}^{n-1} x_j^{i_j} \quad (1)$$

[0010] 其中,n为函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的输入变量数量, $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0$ 表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的n个输入变量,p表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的极性,极性p用三进制形

式表示为 $p_{n-1}p_{n-2}\cdots p_0$, $p_j \in \{0, 1, 2\}$, $j=0, 1, 2, \dots, n-1$, \oplus 表示模3加运算, Σ 为累加符号, 符号“*”为乘运算符号, 下标 $i=0, 1, 2, \dots, 3^n-1$, i 用三进制形式表示为 $i_{n-1}i_{n-2}\cdots i_0$, a_i 为FPRM系数; $a_i \in \{0, 1, 2\}$; Π 表示模3乘运算, $\prod_{j=0}^{n-1} x_j^{i_j}$ 的其展开式为: $\prod_{j=0}^{n-1} x_j^{i_j} = x_{n-1}^{i_{n-1}} x_{n-2}^{i_{n-2}} \cdots x_0^{i_0}$, 其中 $i_j \in \{0, 1, 2\}$, $\dot{x}_j = (x_j \oplus p_j)$, $\dot{x}_j^0 = 1$, $\dot{x}_j^1 = \dot{x}_j$, $\dot{x}_j^2 = \dot{x}_j * \dot{x}_j$, 极性 p 和下标 i 决定变量 \dot{x}_j 的表示形式;

[0011] ①-2 p 极性下的三值FPRM逻辑函数包含两类多输入运算, 两类多输入运算分别为多输入模3加运算和多输入模3乘运算, 根据三值FPRM逻辑函数展开式将三值FPRM逻辑函数分解为多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算, 然后将每个多输入运算分别分解为二输入运算, 得到二输入模3加运算和二输入模3乘运算, 具体分解过程为:

[0012] 将多输入运算的第1个输入变量和第2个输入变量作为第一个二输入运算的两个输入变量, 得到第一个二输入运算的输出变量; 将第一个二输入运算的输出变量和多输入运算的第3个输入变量作为第二个二输入运算的两个输入变量, 得到第二个二输入运算的输出变量; 将第二个二输入运算的输出变量和多输入运算的第4个输入变量作为第三个二输入运算的两个输入变量, 得到第三个二输入运算的输出变量; 依此类推, 直到所有的多输入运算的输入变量作为二输入运算的输入变量, 完成多输入运算的分解;

[0013] 将 p 极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算, 多输入模3加运算也称为多输入模3加门, 多输入模3乘运算也称为多输入模3乘门, 将 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量记为 N , 将 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量记为 W ; 将每个多输入模3加运算分解后得到多个二输入模3加运算, 将每个多输入模3乘运算分解后得到多个二输入模3乘运算, 二输入模3加运算也称为二输入模3加门, 二输入模3乘运算也称为二输入模3乘门; 将第 H 个多输入模3加门分解后的二输入模3加门的数量记为 N_H , $H=1, 2, \dots, N$; 将第 o 个多输入模3乘门分解后的二输入模3乘门的数量记为 W_o , $o=1, 2, \dots, W$;

[0014] ①-3将 p 极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到的所有二输入模3加门和二输入模3乘门引起的功耗作为 p 极性下的三值FPRM电路的功耗, 二输入模3加门引起的功耗采用其开关活动性表示, 二输入模3乘门引起的功耗采用其开关活动性表示, 门电路的开关活动性用其输出端的输出变量概率表示, 二输入模3加门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示, 二输入模3乘门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示;

[0015] ①-4根据公式(2)、(3)和(4)计算第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门的输出变量概率; $k=1, 2, \dots, N_H$;

$$[0016] \quad P_1(k)_H = P_{k_{y11}} * P_{k_{y20}} + P_{k_{y10}} * P_{k_{y21}} + P_{k_{y12}} * P_{k_{y22}} \quad (2)$$

$$[0017] \quad P_2(k)_H = P_{k_{y12}} * P_{k_{y20}} + P_{k_{y11}} * P_{k_{y21}} + P_{k_{y10}} * P_{k_{y22}} \quad (3)$$

$$[0018] \quad P_0(k)_H = 1 - P_1(k)_H - P_2(k)_H \quad (4)$$

[0019] 根据公式(5)、(6)和(7)计算第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门的输出变量概率, $g=1, 2, \dots, W_o$;

$$[0020] \quad Q_1(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r21}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r22}} \quad (5)$$

$$[0021] \quad Q_2(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r22}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r21}} \quad (6)$$

$$[0022] \quad Q_0(g)_o = 1 - Q_1(g)_o - Q_2(g)_o \quad (7)$$

[0023] 其中, $P_1(k)_H$ 表示第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门输出变量为1

的概率, $P_2(k)_H$ 表示第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门输出变量为2的概率, $P_0(k)_H$ 表示第 H 个多输入模3加门分解后的第 k 个二输入模3加门输出变量为0的概率, y_1 和 y_2 表示二输入模3加门的两个输入变量, $m \in \{0, 1, 2\}$, 当 $k=1$ 时, P_{k_y1m} 为多输入模3加运算的第1个输入变量为 m 的概率, P_{k_y2m} 为多输入模3加运算的第2个输入变量为 m 的概率, 当 $k>1$ 时, P_{k_y1m} 为第 $k-1$ 个二输入模3加门输出变量为 m 的概率, P_{k_y2m} 为多输入模3加门的第 $k+1$ 个输入变量为 m 的概率;

[0024] $Q_1(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为1的概率, $Q_2(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为2的概率, $Q_0(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为0的概率, r_1 和 r_2 表示二输入模3乘门的两个输入变量; 当 $g=1$ 时, Q_{g_r1m} 为多输入模3乘运算的第1个输入变量为 m 的概率, Q_{g_r2m} 为多输入模3乘运算的第2个输入变量为 m 的概率, 当 $g>1$ 时, Q_{g_r1m} 为第 $g-1$ 个二输入模3乘门输出变量为 m 的概率, Q_{g_r2m} 为多输入模3乘门的第 $g+1$ 个输入变量为 m 的概率;

[0025] 输入变量 x_j 为1和2的概率是由随即函数产生的概率对 (P_1, P_2) , $P_0 = 1 - P_1 - P_2$; P_0 , P_1 和 P_2 分别为0到1之间某个值, P_0 表示输入变量为0的概率, P_1 表示输入变量为1的概率, P_2 表示输入变量为2的概率;

[0026] ①-5根据二输入模3加门的输出变量概率和二输入模3乘门的输出变量概率计算三值FPRM电路的功耗, 将三值FPRM电路的功耗估计模型表示为:

$$E_{\text{swd}} = 2 \left(\sum_{H=1}^N \left(\sum_{k=1}^{N_H} (P_1(k)_H + P_2(k)_H) \right) + \sum_{o=1}^W \left(\sum_{g=1}^{W_o} (Q_1(g)_o + Q_2(g)_o) \right) \right) \quad (8)$$

[0028] 其中, E_{swd} 表示 p 极性下三值FPRM电路的功耗, N 为 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量, W 为 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量;

[0029] ②设定模拟退火遗传算法中用于计算个体适应度的适应度函数:

[0030] 根据功耗估计模型, 设定模拟退火遗传算法中计算个体适应度的适应度函数: 在模拟退火遗传算法中, 适应度越大表示个体的适应能力越强, 但功耗最佳极性要求功耗越小越好, 因此, 为了便于两者结合, 采用功耗的倒数表示适应度, 得到适应度函数如下:

$$[0031] \quad \text{fitness} = \alpha / E_{\text{swd}}$$

[0032] 其中, 符号“/”表示除运算符, fitness 表示个体的适应度大小; E_{swd} 表示电路功耗; α 为放大系数, 取值为大于等于1000的自然数;

[0033] ③建立三值FPRM电路和模拟退火遗传算法的对应关系:

[0034] 模拟退火遗传算法包含以下几个关键要素: 个体、个体的适应度、适应度最大的个体、最大适应度、交叉操作、变异操作、退火选择操作;

[0035] 三值FPRM电路功耗优化包含以下几个关键要素: 极性、相应极性的功耗、最佳极性、最小功耗、极性交流、极性突变、极性变换;

[0036] 将个体映射到三值FPRM电路功耗优化, 表示为极性; 将个体的适应度映射到三值FPRM电路功耗优化, 表示为相应极性的功耗; 将适应度最大的个体映射到三值FPRM电路功耗优化, 表示为最佳极性; 将最大适应度映射到三值FPRM电路功耗优化, 表示为最小功耗; 将交叉操作映射到三值FPRM电路功耗优化, 表示为极性交流; 将变异操作映射到三值FPRM

电路功耗优化,表示为极性突变;将退火选择操作映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性变换;

[0037] ④设置模拟退火遗传算法相关参数:

[0038] 模拟退火遗传算法需设置4个参数:个体规模 w 、个体迭代次数 z 、基因突变概率 q 、起始温度 T_0 ;令个体规模 $w=50$ 、个体迭代次数 $z=20$ 、基因突变概率 $q=0.01$ 、起始温度 $T_0=100^\circ\text{C}$;

[0039] ⑤采用模拟退火遗传算法得到适应度最大个体和最大适应度,适应度最大个体即为三值FPRM电路的功耗最佳极性;最大适应度即为三值FPRM电路的最小功耗。

[0040] 所述的步骤⑤中采用模拟退火遗传算法得到适应度最大个体和最大适应度的具体过程为:

[0041] ⑤-1用随机函数 $\text{rand}()$ 产生 w 个用 n 位三进制表示的个体,将 w 个个体分别记为 P_1, P_2, \dots, P_w ;

[0042] ⑤-2通过适应度函数计算第 v 个个体 P_v 的适应度, $v=1, 2, 3, \dots, w$,得到个体 P_1, P_2, \dots, P_w 的适应度;

[0043] ⑤-3比较个体 P_1, P_2, \dots, P_w 的适应度,筛选出适应度最大的个体作为适应度最大个体,记录适应度最大个体和最大适应度;

[0044] ⑤-4对个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行交叉操作产生个体 F_1, F_2, \dots, F_w :若 w 为偶数,将 P_1 和 P_2 、 P_3 和 P_4 、 \dots 、 P_{w-1} 和 P_w 两两分别进行交叉操作;若 w 为奇数,将 P_1 和 P_2 、 P_3 和 P_4 、 \dots 、 P_{w-2} 和 P_{w-1} 两两分别进行交叉操作, P_w 不参与交叉操作, F_w 直接继承 P_w ;两个个体 P_e 和 P_u 进行交叉操作产生个体 F_e 和 F_u ,具体过程为:将进行交叉操作的个体 P_e 赋值给 f_e ,个体 P_u 赋值给 f_u ,随机产生一个 n 位二进制码,将该 n 位二进制码记为 A ,根据二进制码 A 更新 f_e 和 f_u ,当二进制码 A 的第 h 位为1时, f_e 的第 h 位保持不变, f_u 的第 h 位保持不变;当二进制码 A 的第 h 位为0时, f_e 的第 h 位继承 f_u 的第 h 位, f_u 的第 h 位继承 f_e 的第 h 位, $h=1, 2, 3, \dots, n$,将交叉操作完成后的 f_e 记为 F_e ,交叉操作完成后的 f_u 记为 F_u ;其中 $u=e+1$,当 w 为偶数时, $e=1, 3, 5, \dots, w-1$; $u=2, 4, 6, \dots, w$;当 w 为奇数时, $e=1, 3, 5, \dots, w-2$; $u=2, 4, 6, \dots, w-1$;

[0045] ⑤-5通过适应度函数计算第 v 个个体 F_v 的适应度,得到个体 F_1, F_2, \dots, F_w 的适应度;

[0046] ⑤-6将个体 F_1, F_2, \dots, F_w 的适应度和目前适应度最大个体的适应度进行比较,更新适应度最大个体和最大适应度;

[0047] ⑤-7将个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行变异操作:对 F_v 的每一位均用随机函数 $\text{rand}()$ 产生一个0到1之间的值,若这个值小于基因突变概率 q ,则这个值对应的位就是 F_v 的变异位,对 F_v 的变异位进行变异,变异规则为“ $0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 0$ ”;

[0048] ⑤-8按照步骤⑤-5~⑤-6对个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行处理,得到更新后的适应度最大个体和最大适应度;

[0049] ⑤-9根据适应度值的大小对个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行排序,根据适应度值的大小对个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行排序;在个体 P_1, P_2, \dots, P_w 和个体 F_1, F_2, \dots, F_w 中各自选择适应度值最优的 $2w/3$ 个个体,组成一组新的个体,新的个体含有 $4w/3$ 个个体;

[0050] ⑤-10对一组新的个体进行多轮退火选择:每一轮退火选择中,首先根据公式(9)产生一个退火温度,对于该退火温度,按公式(10)依次计算各个个体的被选取概率 $P(c)$,同

时用随机函数rand()产生一个筛选概率 t , $0 < t < 1$; 当个体的被选取概率大于筛选概率时, 该个体在这一轮退火选择中被选择, 被选择的个体不再参与下一轮退火选择, 其他未被选择的个体进入下一轮退火选择, 直到筛选出 w 个个体更新个体 P_1, P_2, \dots, P_w 后, 退火选择结束;

$$[0051] \quad T_1 = 1 / \ln(1 / T_0 + 1) \quad (9)$$

$$[0052] \quad P(c) = e^{f(c)/T_l} / \sum_{d=0}^{4w/3} e^{f(d)/T_l} \quad (10)$$

[0053] 其中, T_l 表示第 l 轮的退火温度, $l = 1, 2, \dots$; 第一轮退火选择时, $l = 1$, 第二轮退火选择时, $l = 2$, 以此类推; \ln 表示对数操作; T_0 表示初始温度; $P(c)$ 表示个体 c 的概率; $f(c)$ 表示新的个体中第 c 个个体的适应度值; $c = 1, 2, 3, \dots, 4w/3$; $f(d)$ 表示新的个体中第 d 个个体的适应度值; $d = 1, 2, 3, \dots, 4w/3$;

[0054] ⑤-11按照步骤⑤-2~⑤-3对步骤⑤-10中更新后的个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行处理, 得到适应度最大个体和最大适应度;

[0055] ⑤-12重复步骤⑤-4~⑤-11, 直到满足个体迭代次数 z , 算法结束, 得到适应度最大个体和最大适应度;

[0056] ⑤-13将最后一次得到的适应度最大个体和最大适应度输出, 适应度最大个体即为三值FPRM电路的最佳极性; 最大适应度即为三值FPRM电路的最小功耗。

[0057] 与现有技术相比, 本发明的优点在于首先将三值FPRM电路采用 p 极性下的三值FPRM逻辑函数进行表示, 然后分解三值FPRM逻辑函数中含有的三输入运算, 得到 p 极性下的多个二输入模3加门和多个二输入模3乘门, 将二输入模3加门和二输入模3乘门引起的功耗作为 p 极性下的三值FPRM电路的功耗, 构建得到三值FPRM电路的功耗估计模型, 最后采用模拟退火遗传算法对三值FPRM电路进行功耗最佳极性搜索, 得到功耗最佳极性搜索及最小功耗; 本发明的方法通过建立的三值FPRM电路的功耗估计模型结合模拟退火遗传算法来实现三值FPRM电路功耗最佳极性搜索, 从而实现三值FPRM电路的功耗优化; 随机采用13个MCNC Benchmark电路进行仿真验证, 本发明搜索到的功耗最佳极性与0极性比较, 模3加门数量平均节省57.64%, 模3乘门数量平均节省46.25%, 功耗平均节省73.98%。

具体实施方式

[0058] 以下结合实施例对本发明作进一步详细描述。

[0059] 实施例一: 一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法, 包括以下步骤:

[0060] ①建立三值FPRM电路的功耗估计模型:

[0061] ①-1将三值FPRM电路采用三值FPRM逻辑函数表示为如下形式:

$$[0062] \quad f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0) = \oplus \sum_{i=0}^{3^n-1} a_i * \prod_{j=0}^{n-1} x_j^{i_j} \quad (1)$$

[0063] 其中, n 为函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的输入变量数量, $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0$ 表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的 n 个输入变量, p 表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的极性, 极性 p 用三进制形式表示为 $p_{n-1}p_{n-2}\dots p_0$, $p_j \in \{0, 1, 2\}$, $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$, \oplus 表示模3加运算, Σ 为累加符号, 符号“*”为乘运算符号, 下标 $i = 0, 1, 2, \dots, 3^n-1$, i 用三进制形式表示为 $i_{n-1}i_{n-2}\dots i_0$, a_i 为FPRM

系数; $a_i \in \{0, 1, 2\}$; Π 表示模3乘运算, $\prod_{j=0}^{n-1} x_j^{a_j}$ 的其展开式为: $\prod_{j=0}^{n-1} x_j^{a_j} = x_{n-1}^{a_{n-1}} x_{n-2}^{a_{n-2}} \cdots x_0^{a_0}$, 其中 $i_j \in \{0, 1, 2\}$, $\hat{x}_j = (x_j \oplus p_j)$, $\hat{x}_j^0 = 1$, $\hat{x}_j^1 = \hat{x}_j$, $\hat{x}_j^2 = \hat{x}_j * \hat{x}_j$, 极性p和下标i决定变量 \hat{x}_j 的表示形式;

[0064] ①-2p极性下的三值FPRM逻辑函数包含两类多输入运算, 两类多输入运算分别为多输入模3加运算和多输入模3乘运算, 根据三值FPRM逻辑函数展开式将三值FPRM逻辑函数分解为多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算, 然后将每个多输入运算分别分解为二输入运算, 得到二输入模3加运算和二输入模3乘运算, 具体分解过程为:

[0065] 将多输入运算的第1个输入变量和第2个输入变量作为第一个二输入运算的两个输入变量, 得到第一个二输入运算的输出变量; 将第一个二输入运算的输出变量和多输入运算的第3个输入变量作为第二个二输入运算的两个输入变量, 得到第二个二输入运算的输出变量; 将第二个二输入运算的输出变量和多输入运算的第4个输入变量作为第三个二输入运算的两个输入变量, 得到第三个二输入运算的输出变量; 依此类推, 直到所有的多输入运算的输入变量作为二输入运算的输入变量, 完成多输入运算的分解;

[0066] 将p极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算, 多输入模3加运算也称为多输入模3加门, 多输入模3乘运算也称为多输入模3乘门, 将p极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量记为N, 将p极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量记为W; 将每个多输入模3加运算分解后得到多个二输入模3加运算, 将每个多输入模3乘运算分解后得到多个二输入模3乘运算, 二输入模3加运算也称为二输入模3加门, 二输入模3乘运算也称为二输入模3乘门; 将第H个多输入模3加门分解后的二输入模3加门的数量记为 N_H , $H=1, 2, \dots, N$; 将第o个多输入模3乘门分解后的二输入模3乘门的数量记为 W_o , $o=1, 2, \dots, W$;

[0067] ①-3将p极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到的所有二输入模3加门和二输入模3乘门引起的功耗作为p极性下的三值FPRM电路的功耗, 二输入模3加门引起的功耗采用其开关活动性表示, 二输入模3乘门引起的功耗采用其开关活动性表示, 门电路的开关活动性用其输出端的输出变量概率表示, 二输入模3加门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示, 二输入模3乘门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示;

[0068] ①-4根据公式(2)、(3)和(4)计算第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门的输出变量概率; $k=1, 2, \dots, N_H$;

$$[0069] \quad P_1(k)_H = P_{k_{y11}} * P_{k_{y20}} + P_{k_{y10}} * P_{k_{y21}} + P_{k_{y12}} * P_{k_{y22}} \quad (2)$$

$$[0070] \quad P_2(k)_H = P_{k_{y12}} * P_{k_{y20}} + P_{k_{y11}} * P_{k_{y21}} + P_{k_{y10}} * P_{k_{y22}} \quad (3)$$

$$[0071] \quad P_0(k)_H = 1 - P_1(k)_H - P_2(k)_H \quad (4)$$

[0072] 根据公式(5)、(6)和(7)计算第o个多输入模3乘门分解后的第g个二输入模3乘门的输出变量概率, $g=1, 2, \dots, W_o$;

$$[0073] \quad Q_1(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r21}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r22}} \quad (5)$$

$$[0074] \quad Q_2(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r22}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r21}} \quad (6)$$

$$[0075] \quad Q_0(g)_o = 1 - Q_1(g)_o - Q_2(g)_o \quad (7)$$

[0076] 其中, $P_1(k)_H$ 表示第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门输出变量为1的概率, $P_2(k)_H$ 表示第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门输出变量为2的概率, $P_0(k)_H$ 表示第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门输出变量为0的概率, y_1

和 y_2 表示二输入模3加门的两个输入变量, $m \in \{0, 1, 2\}$,当 $k=1$ 时, P_{k_y1m} 为多输入模3加运算的第1个输入变量为 m 的概率, P_{k_y2m} 为多输入模3加运算的第2个输入变量为 m 的概率,当 $k>1$ 时, P_{k_y1m} 为第 $k-1$ 个二输入模3加门输出变量为 m 的概率, P_{k_y2m} 为多输入模3加门的第 $k+1$ 个输入变量为 m 的概率;

[0077] $Q_1(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为1的概率, $Q_2(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为2的概率, $Q_0(g)_o$ 表示第 o 个多输入模3乘门分解后的第 g 个二输入模3乘门输出变量为0的概率, r_1 和 r_2 表示二输入模3乘门的两个输入变量;当 $g=1$ 时, Q_{gr1m} 为多输入模3乘运算的第1个输入变量为 m 的概率, Q_{gr2m} 为多输入模3乘运算的第2个输入变量为 m 的概率,当 $g>1$ 时, Q_{gr1m} 为第 $g-1$ 个二输入模3乘门输出变量为 m 的概率, Q_{gr2m} 为多输入模3乘门的第 $g+1$ 个输入变量为 m 的概率;

[0078] 输入变量 x_j 为1和2的概率是由随即函数产生的概率对 (P_1, P_2) , $P_0=1-P_1-P_2$; P_0 , P_1 和 P_2 分别为0到1之间某个值, P_0 表示输入变量为0的概率, P_1 表示输入变量为1的概率, P_2 表示输入变量为2的概率;

[0079] ①-5根据二输入模3加门的输出变量概率和二输入模3乘门的输出变量概率计算三值FPRM电路的功耗,将三值FPRM电路的功耗估计模型表示为:

$$E_{\text{swd}} = 2 \left(\sum_{H=1}^N \left(\sum_{k=1}^{N_H} (P_1(k)_H + P_2(k)_H) \right) + \sum_{o=1}^W \left(\sum_{g=1}^{W_o} (Q_1(g)_o + Q_2(g)_o) \right) \right) \quad (8)$$

[0081] 其中, E_{swd} 表示 p 极性下三值FPRM电路的功耗, N 为 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量, W 为 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量;

[0082] ②设定模拟退火遗传算法中用于计算个体适应度的适应度函数:

[0083] 根据功耗估计模型,设定模拟退火遗传算法中计算个体适应度的适应度函数:在模拟退火遗传算法中,适应度越大表示个体的适应能力越强,但功耗最佳极性要求功耗越小越好,因此,为了便于两者结合,采用功耗的倒数表示适应度,得到适应度函数如下:

$$[0084] \quad \text{fitness} = \alpha / E_{\text{swd}}$$

[0085] 其中,符号“/”表示除运算符, fitness 表示个体的适应度大小; E_{swd} 表示电路功耗; α 为放大系数,取值为大于等于1000的自然数;

[0086] ③建立三值FPRM电路和模拟退火遗传算法的对应关系:

[0087] 模拟退火遗传算法包含以下几个关键要素:个体、个体的适应度、适应度最大的个体、最大适应度、交叉操作、变异操作、退火选择操作;

[0088] 三值FPRM电路功耗优化包含以下几个关键要素:极性、相应极性的功耗、最佳极性、最小功耗、极性交流、极性突变、极性变换;

[0089] 将个体映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性;将个体的适应度映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为相应极性的功耗;将适应度最大的个体映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为最佳极性;将最大适应度映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为最小功耗;将交叉操作映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性交流;将变异操作映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性突变;将退火选择操作映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性变换;

[0090] ④设置模拟退火遗传算法相关参数:

[0091] 模拟退火遗传算法需设置4个参数:个体规模 w 、个体迭代次数 z 、基因突变概率 q 、起始温度 T_0 ;令个体规模 $w=50$ 、个体迭代次数 $z=20$ 、基因突变概率 $q=0.01$ 、起始温度 $T_0=100^\circ\text{C}$;

[0092] ⑤采用模拟退火遗传算法得到适应度最大个体和最大适应度,适应度最大个体即为三值FPRM电路的功耗最佳极性;最大适应度即为三值FPRM电路的最小功耗。

[0093] 本实施例中,模拟退火遗传算法采用现有技术中的成熟算法。

[0094] 实施例二:一种三值FPRM电路功耗最佳极性搜索方法,包括以下步骤:

[0095] ①建立三值FPRM电路的功耗估计模型:

[0096] ①-1将三值FPRM电路采用三值FPRM逻辑函数表示为如下形式:

$$[0097] \quad f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0) = \bigoplus_{i=0}^{3^n-1} a_i * \prod_{j=0}^{n-1} \dot{x}_j^{i_j} \quad (1)$$

[0098] 其中, n 为函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的输入变量数量, $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0$ 表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的 n 个输入变量, p 表示函数 $f^p(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0)$ 的极性,极性 p 用三进制形式表示为 $p_{n-1}p_{n-2}\dots p_0$, $p_j \in \{0, 1, 2\}$, $j=0, 1, 2, \dots, n-1$, \bigoplus 表示模3加运算, Σ 为累加符号,符号“*”为乘运算符号,下标 $i=0, 1, 2, \dots, 3^n-1$, i 用三进制形式表示为 $i_{n-1}i_{n-2}\dots i_0$, a_i 为FPRM系数; $a_i \in \{0, 1, 2\}$; Π 表示模3乘运算, $\prod_{j=0}^{n-1} \dot{x}_j^{i_j}$ 的展开式为: $\prod_{j=0}^{n-1} \dot{x}_j^{i_j} = \dot{x}_{n-1}^{i_{n-1}} \dot{x}_{n-2}^{i_{n-2}} \dots \dot{x}_0^{i_0}$,其中 $i_j \in \{0, 1, 2\}$, $\dot{x}_j = (x_j \oplus p_j)$, $\dot{x}_j^0 = 1$, $\dot{x}_j^1 = \dot{x}_j$, $\dot{x}_j^2 = \dot{x}_j * \dot{x}_j$,极性 p 和下标 i 决定变量 \dot{x}_j 的表示形式;

[0099] ①-2 p 极性下的三值FPRM逻辑函数包含两类多输入运算,两类多输入运算分别为多输入模3加运算和多输入模3乘运算,根据三值FPRM逻辑函数展开式将三值FPRM逻辑函数分解为多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算,然后将每个多输入运算分别分解为二输入运算,得到二输入模3加运算和二输入模3乘运算,具体分解过程为:

[0100] 将多输入运算的第1个输入变量和第2个输入变量作为第一个二输入运算的两个输入变量,得到第一个二输入运算的输出变量;将第一个二输入运算的输出变量和多输入运算的第3个输入变量作为第二个二输入运算的两个输入变量,得到第二个二输入运算的输出变量;将第二个二输入运算的输出变量和多输入运算的第4个输入变量作为第三个二输入运算的两个输入变量,得到第三个二输入运算的输出变量;依此类推,直到所有的多输入运算的输入变量作为二输入运算的输入变量,完成多输入运算的分解;

[0101] 将 p 极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到多个多输入模3加运算和多个多输入模3乘运算,多输入模3加运算也称为多输入模3加门,多输入模3乘运算也称为多输入模3乘门,将 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量记为 N ,将 p 极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量记为 W ;将每个多输入模3加运算分解后得到多个二输入模3加运算,将每个多输入模3乘运算分解后得到多个二输入模3乘运算,二输入模3加运算也称为二输入模3加门,二输入模3乘运算也称为二输入模3乘门;将第 H 个多输入模3加门分解后的二输入模3加门的数量记为 N_H , $H=1, 2, \dots, N$;将第 o 个多输入模3乘门分解后的二输入模3乘门的数量记为 W_o , $o=1, 2, \dots, W$;

[0102] ①-3将 p 极性下的三值FPRM逻辑函数分解后得到的所有二输入模3加门和二输入模3乘门引起的功耗作为 p 极性下的三值FPRM电路的功耗,二输入模3加门引起的功耗采用

其开关活动性表示,二输入模3乘门引起的功耗采用其开关活动性表示,门电路的开关活动性用其输出端的输出变量概率表示,二输入模3加门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示,二输入模3乘门引起的功耗采用其输出端的输出变量概率表示;

[0103] ①-4根据公式(2)、(3)和(4)计算第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门的输出变量概率; $k=1,2,\dots,N_H$;

$$[0104] \quad P_1(k)_H = P_{k_{y11}} * P_{k_{y20}} + P_{k_{y10}} * P_{k_{y21}} + P_{k_{y12}} * P_{k_{y22}} \quad (2)$$

$$[0105] \quad P_2(k)_H = P_{k_{y12}} * P_{k_{y20}} + P_{k_{y11}} * P_{k_{y21}} + P_{k_{y10}} * P_{k_{y22}} \quad (3)$$

$$[0106] \quad P_0(k)_H = 1 - P_1(k)_H - P_2(k)_H \quad (4)$$

[0107] 根据公式(5)、(6)和(7)计算第o个多输入模3乘门分解后的第g个二输入模3乘门的输出变量概率, $g=1,2,\dots,W_o$:

$$[0108] \quad Q_1(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r21}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r22}} \quad (5)$$

$$[0109] \quad Q_2(g)_o = Q_{g_{r11}} * Q_{g_{r22}} + Q_{g_{r12}} * Q_{g_{r21}} \quad (6)$$

$$[0110] \quad Q_0(g)_o = 1 - Q_1(g)_o - Q_2(g)_o \quad (7)$$

[0111] 其中, $P_1(k)_H$ 表示第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门输出变量为1的概率, $P_2(k)_H$ 表示第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门输出变量为2的概率, $P_0(k)_H$ 表示第H个多输入模3加门分解后的第k个二输入模3加门输出变量为0的概率, y_1 和 y_2 表示二输入模3加门的两个输入变量, $m \in \{0,1,2\}$,当 $k=1$ 时, $P_{k_{y1m}}$ 为多输入模3加运算的第1个输入变量为m的概率, $P_{k_{y2m}}$ 为多输入模3加运算的第2个输入变量为m的概率,当 $k>1$ 时, $P_{k_{y1m}}$ 为第k-1个二输入模3加门输出变量为m的概率, $P_{k_{y2m}}$ 为多输入模3加门的第k+1个输入变量为m的概率;

[0112] $Q_1(g)_o$ 表示第o个多输入模3乘门分解后的第g个二输入模3乘门输出变量为1的概率, $Q_2(g)_o$ 表示第o个多输入模3乘门分解后的第g个二输入模3乘门输出变量为2的概率, $Q_0(g)_o$ 表示第o个多输入模3乘门分解后的第g个二输入模3乘门输出变量为0的概率, r_1 和 r_2 表示二输入模3乘门的两个输入变量;当 $g=1$ 时, $Q_{g_{r1m}}$ 为多输入模3乘运算的第1个输入变量为m的概率, $Q_{g_{r2m}}$ 为多输入模3乘运算的第2个输入变量为m的概率,当 $g>1$ 时, $Q_{g_{r1m}}$ 为第g-1个二输入模3乘门输出变量为m的概率, $Q_{g_{r2m}}$ 为多输入模3乘门的第g+1个输入变量为m的概率;

[0113] 输入变量 x_j 为1和2的概率是由随即函数产生的概率对 (P_1, P_2) , $P_0 = 1 - P_1 - P_2$; P_0 , P_1 和 P_2 分别为0到1之间某个值, P_0 表示输入变量为0的概率, P_1 表示输入变量为1的概率, P_2 表示输入变量为2的概率;

[0114] ①-5根据二输入模3加门的输出变量概率和二输入模3乘门的输出变量概率计算三值FPRM电路的功耗,将三值FPRM电路的功耗估计模型表示为:

$$[0115] \quad E_{swd} = 2 \left(\sum_{H=1}^N \left(\sum_{k=1}^{N_H} (P_1(k)_H + P_2(k)_H) \right) + \sum_{o=1}^W \left(\sum_{g=1}^{W_o} (Q_1(g)_o + Q_2(g)_o) \right) \right) \quad (8)$$

[0116] 其中, E_{swd} 表示p极性下三值FPRM电路的功耗, N 为p极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3加门的数量, W 为p极性下三值FPRM逻辑函数分解后的多输入模3乘门的数量;

[0117] ②设定模拟退火遗传算法中用于计算个体适应度的适应度函数:

[0118] 根据功耗估计模型,设定模拟退火遗传算法中计算个体适应度的适应度函数:在

模拟退火遗传算法中,适应度越大表示个体的适应能力越强,但功耗最佳极性要求功耗越小越好,因此,为了便于两者结合,采用功耗的倒数表示适应度,得到适应度函数如下:

[0119] $fitness = \alpha / E_{swd}$

[0120] 其中,符号“/”表示除运算符,fitness表示个体的适应度大小; E_{swd} 表示电路功耗; α 为放大系数,取值为大于等于1000的自然数;

[0121] ③建立三值FPRM电路和模拟退火遗传算法的对应关系:

[0122] 模拟退火遗传算法包含以下几个关键要素:个体、个体的适应度、适应度最大的个体、最大适应度、交叉操作、变异操作、退火选择操作;

[0123] 三值FPRM电路功耗优化包含以下几个关键要素:极性、相应极性的功耗、最佳极性、最小功耗、极性交流、极性突变、极性变换;

[0124] 将个体映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性;将个体的适应度映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为相应极性的功耗;将适应度最大的个体映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为最佳极性;将最大适应度映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为最小功耗;将交叉操作映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性交流;将变异操作映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性突变;将退火选择操作映射到三值FPRM电路功耗优化,表示为极性变换;

[0125] ④设置模拟退火遗传算法相关参数:

[0126] 模拟退火遗传算法需设置4个参数:个体规模 w 、个体迭代次数 z 、基因突变概率 q 、起始温度 T_0 ;令个体规模 $w=50$ 、个体迭代次数 $z=20$ 、基因突变概率 $q=0.01$ 、起始温度 $T_0=100^\circ\text{C}$;

[0127] ⑤采用模拟退火遗传算法得到适应度最大个体和最大适应度,适应度最大个体即为三值FPRM电路的功耗最佳极性;最大适应度即为三值FPRM电路的最小功耗。

[0128] 本实施例中,步骤⑤中采用模拟退火遗传算法得到适应度最大个体和最大适应度的具体过程为:

[0129] ⑤-1用随机函数rand()产生 w 个用 n 位三进制表示的个体,将 w 个个体分别记为 P_1, P_2, \dots, P_w ;

[0130] ⑤-2通过适应度函数计算第 v 个个体 P_v 的适应度, $v=1, 2, 3, \dots, w$,得到个体 P_1, P_2, \dots, P_w 的适应度;

[0131] ⑤-3比较个体 P_1, P_2, \dots, P_w 的适应度,筛选出适应度最大的个体作为适应度最大个体,记录适应度最大个体和最大适应度;

[0132] ⑤-4对个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行交叉操作产生个体 F_1, F_2, \dots, F_w :若 w 为偶数,将 P_1 和 P_2, P_3 和 P_4, \dots, P_{w-1} 和 P_w 两两分别进行交叉操作;若 w 为奇数,将 P_1 和 P_2, P_3 和 P_4, \dots, P_{w-2} 和 P_{w-1} 两两分别进行交叉操作, P_w 不参与交叉操作, F_w 直接继承 P_w ;两个个体 P_e 和 P_u 进行交叉操作产生个体 F_e 和 F_u ,具体过程为:将进行交叉操作的个体 P_e 赋值给 f_e ,个体 P_u 赋值给 f_u ,随机产生一个 n 位二进制码,将该 n 位二进制码记为 A ,根据二进制码 A 更新 f_e 和 f_u ,当二进制码 A 的第 h 位为1时, f_e 的第 h 位保持不变, f_u 的第 h 位保持不变;当二进制码 A 的第 h 位为0时, f_e 的第 h 位继承 f_u 的第 h 位, f_u 的第 h 位继承 f_e 的第 h 位, $h=1, 2, 3, \dots, n$,将交叉操作完成后的 f_e 记为 F_e ,交叉操作完成后的 f_u 记为 F_u ;其中 $u=e+1$,当 w 为偶数时, $e=1, 3, 5, \dots, w-1$; $u=2, 4, 6, \dots, w$;当 w 为奇数时, $e=1, 3, 5, \dots, w-2$; $u=2, 4, 6, \dots, w-1$;

[0133] ⑤-5通过适应度函数计算第 v 个个体 F_v 的适应度,得到个体 F_1, F_2, \dots, F_w 的适应度;

[0134] ⑤-6将个体 F_1, F_2, \dots, F_w 的适应度和目前适应度最大个体的适应度进行比较,更新适应度最大个体和最大适应度;

[0135] ⑤-7将个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行变异操作:对 F_v 的每一位均用随机函数 $\text{rand}()$ 产生一个0到1之间的值,若这个值小于基因突变概率 q ,则这个值对应的位就是 F_v 的变异位,对 F_v 的变异位进行变异,变异规则为“0 \rightarrow 1,1 \rightarrow 2,2 \rightarrow 0”;

[0136] ⑤-8按照步骤⑤-5 \sim ⑤-6对个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行处理,得到更新后的适应度最大个体和最大适应度;

[0137] ⑤-9根据适应度值的大小对个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行排序,根据适应度值的大小对个体 F_1, F_2, \dots, F_w 进行排序;在个体 P_1, P_2, \dots, P_w 和个体 F_1, F_2, \dots, F_w 中各自选择适应度值最优的 $2w/3$ 个个体,组成一组新的个体,新的个体含有 $4w/3$ 个个体;

[0138] ⑤-10对一组新的个体进行多轮退火选择:每一轮退火选择中,首先根据公式(9)产生一个退火温度,对于该退火温度,按公式(10)依次计算各个个体的被选取概率 $P(c)$,同时用随机函数 $\text{rand}()$ 产生一个筛选概率 $t, 0 < t < 1$;当个体的被选取概率大于筛选概率时,该个体在这一轮退火选择中被选择,被选择的个体不再参与下一轮退火选择,其他未被选择的个体进入下一轮退火选择,直到筛选出 w 个个体更新个体 P_1, P_2, \dots, P_w 后,退火选择结束;

$$[0139] \quad T_l = 1 / \ln(1 / T_0 + 1) \quad (9)$$

$$[0140] \quad P(c) = e^{f(c)/T_l} / \sum_{d=0}^{4w/3} e^{f(d)/T_l} \quad (10)$$

[0141] 其中, T_l 表示第 l 轮的退火温度, $l=1, 2, \dots$;第一轮退火选择时, $l=1$,第二轮退火选择时, $l=2$,以此类推; \ln 表示对数操作; T_0 表示初始温度; $P(c)$ 表示个体 c 的概率; $f(c)$ 表示新的个体中第 c 个个体的适应度值; $c=1, 2, 3, \dots, 4w/3$; $f(d)$ 表示新的个体中第 d 个个体的适应度值; $d=1, 2, 3, \dots, 4w/3$;

[0142] ⑤-11按照步骤⑤-2 \sim ⑤-3对步骤⑤-10中更新后的个体 P_1, P_2, \dots, P_w 进行处理,得到适应度最大个体和最大适应度;

[0143] ⑤-12重复步骤⑤-4 \sim ⑤-11,直到满足个体迭代次数 z ,算法结束,得到适应度最大个体和最大适应度;

[0144] ⑤-13将最后一次得到的适应度最大个体和最大适应度输出,适应度最大个体即为三值FPRM电路的最佳极性;最大适应度即为三值FPRM电路的最小功耗。

[0145] 本发明的功耗最佳极性搜索方法在Windows 7 64位操作系统,Intel (R) Core (TM) i3-2130 CPU 3.40GHZ,4G RAM运行环境下,用C语言通过VC6.0编译实现,随机采用13个MCNC Benchmark电路进行仿真验证,将采用本发明的方法搜索到的功耗最佳极性与0极性进行比较。为计算三值FPRM电路的开关活动性,随机产生15组输入信号概率: $(P_1, P_2) = \{(0.21, 0.53), (0.49, 0.30), (0.33, 0.24), (0.68, 0.13), (0.15, 0.26), (0.57, 0.22), (0.18, 0.51), (0.71, 0.24), (0.08, 0.35), (0.57, 0.32), (0.46, 0.28), (0.17, 0.05), (0.32, 0.43), (0.14, 0.72), (0.25, 0.61)\}$ 。

[0146] 采用本发明的功耗最佳极性搜索方法进行最佳极性搜索的结果如表1所示。表中,

列1表示电路名称,列2表示输入/输出变量个数;列3、列4和列5依次分别表示0极性下二输入模3加的门数量、二输入模3乘的门数量和电路功耗;列6、列7、列8和列9依次分别表示采用本发明的方法搜索到的最佳极性以及最佳极性下三值FPRM电路二输入模3加门数量、二输入模3乘门数量和功耗。

[0147] 表1三值FPRM电路最佳极性搜索结果

电路名称	输入变量个数/ 输出变量个数	0 极性			最佳极性			
		模3加门数量	模3乘门数量	功耗	极性	模3加门数量	模3乘门数量	功耗
dist	8/5	42	175	146.13	51	33	145	75.33
misex1	8/7	42	166	149.42	44	16	75	34.02
tms	8/16	51	202	175.56	26	23	109	61.78
max46_d	9/1	151	692	572.92	152	109	554	254.66
sex	9/14	107	516	399.02	150	42	234	94.32
clpl	11/5	20	51	72.08	259	4	17	7.37
br1	12/8	47	264	185.03	82	15	120	27.67
newapla	12/10	68	270	256.00	662	24	121	73.78
cu	14/11	5	8	20.63	1187	2	5	3.80
mp2d	14/14	11	28	42.36	2096	5	18	12.12
dk48	15/17	1008	7998	4253.48	4008	289	3121	888.44
newtpla	15/5	873	6027	3714.82	5306	251	1989	889.58
pm1	16/13	19	45	69.38	5405	9	31	10.25

[0149] 与0极性相比,最佳极性在模3加的的门数量、模3乘的门数量以及功耗上节省的百分比如表2所示。模3加的的门数量、模3乘的门数量和功耗节省的百分比定义如下:

[0150] $Save_{Mod3-A} \% = \frac{Mod3-A_0 - Mod3-A_{SAGA}}{Mod3-A_0} \times 100\% \quad (11)$

[0151] $Save_{Mod3-M} \% = \frac{Mod3-M_0 - Mod3-M_{SAGA}}{Mod3-M_0} \times 100\% \quad (12)$

[0152] $Save_{Power} \% = \frac{Power_0 - Power_{SAGA}}{Power_0} \times 100\% \quad (13)$

[0153] 其中,Save_{Mod3-A}、Save_{Mod3-M}和Save_{Power}依次分别表示模3加门数量、模3乘门数量和功耗的节省;Mod3-A₀、Mod3-M₀和Power₀依次分别表示0极性下模3加门数量、模3乘门数量和功耗大小;Mod3-A_{SAGA}、Mod3-M_{SAGA}和SA_{SAGA}依次分别表示本发明方法搜索到的最佳极性下模3加门数量、模3乘门数量和功耗大小。采用本发明的方法,三值FPRM电路门数和功耗节省百分比如表2所示。

[0154] 表2三值FPRM电路门数和功耗节省百分比

[0155]

电路名称	输入变量个数	时间(s)	节省 (%)
------	--------	-------	--------

[0156]

	f 输出变量个数		模3加门 数量	模3乘门 数量	功耗
dist	8/5	5.28	21.43%	17.14%	48.45%
misex1	8/7	4.88	61.90%	54.82%	77.23%
tms	8/16	5.07	54.90%	46.04%	64.81%
max46_d	9/1	24.68	27.81%	19.94%	55.55%
sex	9/14	15.69	60.75%	54.65%	76.36%
clp1	11/5	29.03	80.00%	66.67%	89.78%
br1	12/8	32.48	68.09%	54.55%	85.05%
newapla	12/10	42.25	64.71%	55.19%	71.18%
cu	14/11	121.81	60.00%	37.50%	81.58%
mp2d	14/14	82.40	54.55%	35.71%	71.39%
dk48	15/17	3122.73	71.33%	60.98%	79.11%
newtpla	15/5	2748.40	71.25%	67.00%	76.05%
pml	16/13	386.77	52.63%	31.11%	85.23%
平均节省 (%)			57.64%	46.25%	73.98%

[0157] 分析数据可知,采用本发明的方法搜索到的功耗最佳极性与0极性相比优化效果明显,其中clp1电路在模3加门数量、模3乘门数量和功耗分别节省80.00%、66.67%和89.78%,13个测试电路在模3加门数量、模3乘门数量和功耗平均节省57.64%、46.25%和73.98%。