

基于翻转信息熵的组合逻辑电路功耗分析

张 盛,周润德,羊性滋
(清华大学微电子学研究所,北京 100084)

摘 要: 基于信息熵的复杂度分析方法是在 VLSI 设计流程的高层次抽象阶段对组合逻辑电路功耗和面积进行分析估计的可行方法之一. 本文通过提出新的利用翻转信息熵进行电路实现面积和功耗估计的理论方法,改善了面积和功耗估计精度. 大量基于随机电路和 BENCHMARK 电路的实验结果表明,上述方法能够使面积和功耗估计的相对误差分别降低 24.3% (从 12.74% 到 9.65%) 和 15.4% (从 13.67% 到 11.57%).

关键词: 组合电路; 低功耗设计; 信息熵

中图分类号: TP331; TN431 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 08-1256-04

Power Analysis of Combinational Circuits Based on Transition Entropy

ZHANG Sheng, ZHOU Run-de, YANG Xing-zi

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For control circuits and random logic, signal complexity evaluated by information entropy (or informational energy) had been calculated to estimate the power consumption of circuits in the past research in the high-level abstract step of VLSI design flow. This paper improved the estimation accuracy for power and area costs of combinational circuits at the behavioral design level, with transition information entropy. Lots of experiments had been implemented to prove the improved estimation accuracy compared to the traditional analytic method. The experimental results with BENCHMARK circuits show that relative errors of area and power estimation have been reduced 24.3% (12.74% to 9.65%) and 15.4% (13.67% to 11.57%).

Key words: combinational circuit; low power; information entropy

1 引言

随着集成电路工艺的发展,数字芯片的集成度不断提高,功耗问题成为超大规模集成电路(VLSI)设计研究的一个重要领域. 尤其对于嵌入式系统,低的功耗意味着更长的电池使用时间. 门级翻转的功耗估计方法可以分为两大类:统计方法(动态方法)和概率方法(静态方法)^[1]. 高层次设计流程中,尽早的得到对实现功耗的估计,就能尽早进行优化和设计的折衷. 和门级不同的是,高层次抽象层次的功耗估计更多地考虑估计的一致性而不是准确. 对不同电路,估计值和最终实现结果的线性关系比绝对估计误差更加重要. 文献[2~4]利用分析的建模方法,提出了一种参数化的功耗宏模型. 然而,灵活性和准确性之间的折衷对于这个缺乏准确信息的设计抽象阶段仍然是一个有挑战的工作. 基于 Shannon 信息熵的分析方法被认为是进行控制和随机逻辑电路高层次行为及功耗和面积估计的有效方法. 在假定电路面积和计算复杂度之间存在线性关系的前提下,Herleman 指出,可以用信息熵衡量的计算复杂度进行逻辑电路的面积和功耗估计^[5]. M. Nemani 和 F. N. Najm 提出了通过输出信息熵对逻辑电路进行功耗和面积

估计的方法^[6]. 在此基础上,我们曾经提出了多输出布尔函数考虑相关性的面积和功耗估算一级近似公式,对各种电路都能获得相对比较平均和合理的面积、功耗估计值^[7].

2 动态功耗的熵估计方法

忽略漏电流功耗,一个 N 门的逻辑电路平均功耗可认为是所有节点电容和翻转率乘积累计的动态翻转功耗结果,可用总电容 C_{agg} 和平均翻转率 D_{agg} 的乘积来近似,如公式(1):

$$P_{avg} = 0.5V^2f \sum_{i=1}^N C_i \cdot D_i = 0.5V^2fC_{agg} \cdot D_{agg} \quad (1)$$

在传统信息熵功耗估计理论中, C_{agg} 可以用电路的面积来近似,并且和平均翻转率 D_{agg} 一样都可用电路逻辑的熵值来衡量.

对于一个 m 输入的布尔逻辑 $F(f_1, f_2, \dots, f_m)$, 其中 $f_k = f_k(X) = f_k(x_1, x_2, \dots, x_m)$, $k = 1, 2, \dots, n$, 输入熵和输出熵代表了输入和输出向量的信号复杂度,在过去的研究中用来衡量逻辑的计算复杂度. 逻辑 F 的输入熵 $H_I(F)$ 和逻辑的输出熵 $H_O(F)$ 可以分别按照公式(2)和(3)计算,其中 p_i 代表输入向量 X 取值为 X_i 的概率, q_i 代表输入向量 Y 取值为 Y_i 的概率

收稿日期:2003-07-25;修回日期:2003-11-15

基金项目:国家自然科学基金(No. 59995550-1);清华大学 985 关键研究基金

率:

$$H_i(F) = \sum_{i=1}^{2^m} p_i \log_2 \frac{1}{p_i} \quad (2)$$

$$H_o(F) = \sum_{i=1}^{2^n} q_i \log_2 \frac{1}{q_i} \quad (3)$$

电路平均翻转密度可以用公式(4)近似计算:

$$D = k_D \cdot H \quad (4)$$

其中 k_D 为比例因子, H 为电路的平均熵, 通常可以用电路的输入输出熵按照公式(5)计算:

$$H = \frac{2}{3(m+n)} (H_i + H_o) \quad (5)$$

其中 m 和 n 分别是电路的输入和输出端口数。

在高层次设计阶段, 电路的翻转电容可以用电路的面积来估计, 而后者可以用布尔逻辑的计算复杂度来近似估计。所以, 在后续章节中, 我们讨论电路面积而不是电容。基于输出熵 H 的公式(6)经常被用于计算 m 输入单输出逻辑电路面积:

$$\begin{aligned} AREA &= k_A \cdot 2^m H_o \quad m \leq 10 \\ &= k_A \cdot \frac{2^m}{m} H_o \quad m > 10 \end{aligned} \quad (6)$$

本文中我们提出通过翻转熵与用面积衡量的电路计算复杂度之间更好的线性关系来获得比传统输出熵方法更好的估计精度。同过去的研究一样^[6], 我们把 UC Berkeley 开发的 SIS 综合系统的实现面积结果作为估计精度评价的标准。在公式(6)中, 电路的输入端口数 m 都与熵估计因素无关, 因此在本文中, 我们只讨论 $m < 10$ 的情况。

3 改进的面积估计模型

以图 1 中的两个 3 输入单输出组合逻辑电路为例, 尽管电路 Y_1 和 Y_2 的输出为 1 概率同为 0.375, 但为一项 (1-item) 的位置不同导致电路的实现结构不同。在逻辑综合之前, 传统的输出熵面积估计方法不能从电路行为正确的估计面积, 而我们提出的翻转信息熵估计方法则解决了这个问题, 从图 1

	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0
	0	1	0	0	0
	0	1	1	1	1
	1	0	0	0	1
	1	0	1	0	0
	1	1	0	1	0
	1	1	1	1	1
SIS 面积综合结果				5	10
H_o				3.3160	3.3160
H_i				2.3644	3.7675

到输出所需计算的复杂度, 我们首先定义了概率相似的概念。

定义 1 研究对象 x 和 y , 自定义的事件集合 T , 对任何事件 $t \in T$, 根据对象 x 发生的所有 t 事件组成的样本集合, 计算对象 y 同时发生事件 t 的概率为 $P_t(x|y)$, 则称 y 与 x 存

在 $P_t(x|y)$ 的概率相似。

图 1 中的实例说明, 输出序列中为 1 项排列顺序的差异, 导致了电路具体实现结构的不同, 因此, 我们将定义 1 中组成集合 T 的事件, 从为 1 事件和为 0 事件, 改进为 $1 > 0$ 事件和 $0 > 1$ 事件, 其它不翻转情况无需专门考虑。下面定义了同向翻转相似概率 P_i^+ 和反向翻转相似概率 P_i^- (见定义 2), 并提出了基于相似概率的翻转信息熵 H_i (见定义 3)。

定义 2 对 m 输入 (x_0, x_1, \dots, x_{m-1}) 单输出 y 逻辑电路, 输入 x_i 的所有由 $0 \rightarrow 1$ 翻转的时候,

其中 ($i=0, 1, \dots, m-1$), 输出 y 由 $0 \rightarrow 1$ 和 $1 \rightarrow 0$ 的翻转次数 n^+ 和 n^- 除以 x_i 总的翻转次数 $n/2$, 被分别定义为输出 y 和输入 x_i 的同向翻转概率 P_i^+ 和反向翻转概率 P_i^- , 即:

$$P_i^+ = \frac{2n^+}{n} \quad P_i^- = \frac{2n^-}{n}$$

定义 3 在忽略同向翻转和反向翻转之间差异 (在电路实现中差异为一个反向器) 前提下, 对 m 输入 (x_0, x_1, \dots, x_{m-1}) 单输出 y 的逻辑电路来说, 输入位 x_i ($i=0, 1, \dots, m-1$) 翻转时, 输出 y 同向翻转和反向翻转的概率分别为 P_i^+ 和 P_i^- , 分别计算 $H(P_i^+)$ 和 $H(P_i^-)$, 则输出 y 与输入 x_i 的翻转相似度 S_i 可通过输出 y 与输入 x_i 的翻转信息熵来衡量:

$$\begin{aligned} S_i &= H(P_i^+) + H(P_i^-) \\ H(P_i^+) &= \left[P_i^+ \log_2 \left(\frac{1}{P_i^+} \right) + (1 - P_i^+) \log_2 \left(\frac{1}{1 - P_i^+} \right) \right] \\ H(P_i^-) &= \left[P_i^- \log_2 \left(\frac{1}{P_i^-} \right) + (1 - P_i^-) \log_2 \left(\frac{1}{1 - P_i^-} \right) \right] \end{aligned}$$

我们对不同输入 x_i 得到的翻转相似度 S_i 加和求平均, 得到整个电路的翻转信息熵 H_i , 并与同时求出的实际相关输入数 m 一起, 用公式(7)对面积进行估计, 并与估计公式(8)在 m 从 3 到 9 的取值范围进行了实验对比。

$$AREA_t = 2^m \cdot H_i = \frac{2^m}{m-1} \left\{ \sum_{i=1}^m S_i \right\} \quad (7)$$

$$AREA_o = 2^m \cdot H_o \quad (8)$$

总翻转信息熵 H_i 不仅考虑了输出为 1 概率 P^1 对电路实现的影响, 还考虑了输入与输出之间具体的映射关系对电路实现的影响, 因此能更精确反映从输入到输出的运算复杂度, 从而对电路的实现面积进行更精确的估计, 实验结果证明了上述观点。

4 实验结果

4.1 面积估计

我们以随机产生的 m 输入单输出逻辑电路 (每个取值 m 产生 300 个电路, m 从 3 到 9) 为研究样本电路, 对比了翻转熵估计和传统熵估计结果。从图 2 可以看出, 翻转熵估计结果

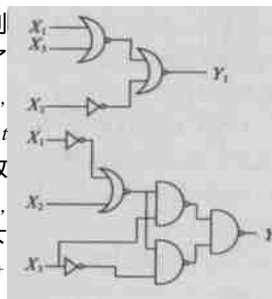


图 1 组合逻辑的真值表、电路实现和综合面积与不同熵估计方法的结果比较

$AREA_i$ 和输出熵估计结果 $AREA_o$ 和 SIS 系统综合的面积结果 $AREA$ 的一致性有明显差异的(黑点的散布范围越窄,则估计与综合结果越一致).表 1 给出了基于随机产生组合电路的实验结果.针对不同的输入数 m ,对大量电路的实验数据进行 $y = A \cdot x + B$ 线性拟合,其中误差项为线性拟合均方误差.数据结果表明翻转信息熵的估计能得到较传统输出熵估计更高的精度,后者的估计结果仅依赖于输出信号的为 1 概率 P^1 .这说明输入与输出相关相似程度与电路输出的为 1 概率 P^1 共同决定了电路计算所需要的面积复杂度.

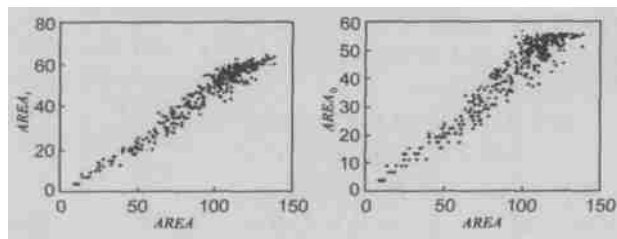


图 2 $m=7$ 的电路面积与 H_i 和 H_o 估计

表 1 翻转熵和输出熵估计与综合面积结果的比较

m	翻转熵估计			输出熵估计		
	A	B	误差 %	A	B	误差 %
3	2.524	-0.96	15.6	2.345	-0.374	32.3
4	2.446	-0.968	15.0	2.272	0.431	28.1
5	2.041	2.176	11.8	2.098	3.247	19.1
6	2.045	3.226	10.3	2.187	4.128	15.2
7	1.914	7.719	7.6	2.042	9.981	10.1
8	1.848	16.079	6.6	1.979	20.371	8.7
9	1.818	28.358	6.9	1.944	37.152	9.2

在大量随机电路 ($m=7$) 基础上,我们分析了 H_i 和 H_o 估计相对于不同的 1-item 数目(从 1 到 64)的相对误差.从图 3

可以看出,当电路输出的为一项 (1-item) 的概率从 0 变为 0.5 的时候,熵估计方法的面积估计值和绝对误差都变大,而相对估计误差变小. H_i 估计的相对误差在所有情况下都比 H_o 估计的相对误差好,只在为一项数目为 1 时候误差相同.显然,根据熵估计结果的对称特性,为一项数目从 65 到 127 和从 1 到 63 的结果为镜像对称关系.

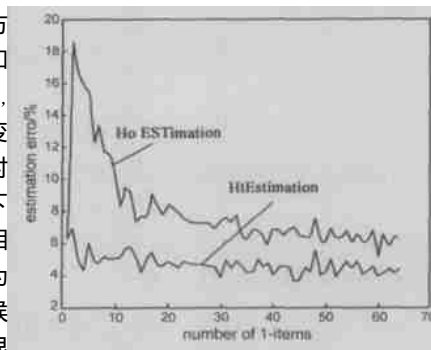


图 3 不同为一项数的 H_o 和 H_i 的相对估计误差

4.2 功耗估计

我们对 MCNC 91 中部分 Benchmark 电路的综合结果和不同的熵估计方法进行了比较.由于形式简单(所有子模块电路输出的为 1 项数目都为 1)电路的翻转熵和输出熵估计结果相同(如 ISCAS 85 电路),在表 2 只给出了子模块电路输出为 1 项数不全为 1 的部分电路的翻转熵和输出熵面积和功耗的估计结果,并与 SIS 综合结果进行比较.线性回归分析表明翻转信息熵面积估计误差较输出熵估计方法降低了 3.1%.面积和功耗估计的相对误差降低了 24.3% (从 12.74% 到 9.65%) 和 15.4% (从 13.67% 到 11.57%),其中一些电路的输出熵估计误差比翻转熵估计小,但误差项仅代表了各个电路与线性回归分析结果之间的偏差,只有最后的平均值体现了电路的面积和功耗估计值的一致程度.

表 2 翻转熵和输出熵估计与面积及功耗综合结果的比较

电路	SIS		翻转熵估计			输出熵估计			
	面积	功耗 μw	面积	误差 %	功耗 μw	误差 %	面积	误差 %	功耗 μw
cm42a	47	51.1	48.4753	3.14	53.8706	5.42	47.6725	1.43	53.7314
cm82a	46	55	42.7623	7.04	49.6735	9.68	40.1379	12.74	48.2754
cm85a	72	69.5	72.9036	1.26	74.3275	6.95	71.6083	0.54	73.1517
cm138a	45	45	53.2031	18.23	59.0713	31.27	59.6036	32.45	64.6047
cm150a	83	94.1	74.2811	10.50	77.3020	17.85	74.3125	10.47	76.7289
cm151a	41	48.4	50.0834	22.15	56.2964	16.31	51.0913	24.61	57.4187
cm152a	45	53.1	45.5490	1.22	53.9794	1.66	49.4897	9.98	57.7050
cm162a	82	74.7	73.8217	9.97	75.9085	1.62	72.8466	11.16	75.0447
cm163a	79	76.8	71.9405	8.94	74.6466	2.80	70.8291	10.34	73.6795
cmb	83	86.4	95.8619	15.50	97.3613	12.69	94.4896	13.84	94.8453
decod	72	87.4	66.1312	8.15	69.0616	20.98	62.9234	12.61	66.3087
				9.65		11.57		12.74	

5 结论

综上所述,本文讨论了组合逻辑电路的功耗估计的基础理论,并且证明了输入输出信号之间的相关相似分析是一种更好的电路面积估计方法.大量的实验结果说明了与传统的输出信息熵方法相比,翻转信息熵具有与组合逻辑电路面积

衡量的实现复杂度之间更加一致的关系,证明了对于 m 输入单数出的逻辑电路,基于翻转信息熵的方法能够获得更好的估计精度.输入端口数 m 并没有在本文中讨论,但是在过去基于输出信息熵的大多数方法都可以同样采用翻转信息熵来实现.进一步的研究将可望解决多输出逻辑电路的功耗和面积估计问题.

参考文献:

- [1] F N Najm. A survey of power estimation techniques in VLSI circuits [J]. IEEE Trans ,on VLSI Systems ,1994 ,2(4) :446 - 455.
- [2] L Benini ,A Bogliolo. Regression models for behavioral power estimation [A]. in Proc. PATMOS-96: Int Workshop on Power and Timing Modeling ,Optimization and Simulation [C]. Bologna ,1996. 179 - 186.
- [3] L Benini ,A Bogliolo. Characterization-free behavioral power modeling [A]. Proc DATE [C]. Paris ,1998. 767 - 773.
- [4] R Burch ,F Najm. A Monte-Carlo approach for power estimation [J]. IEEE Trans on VLSI Systems ,1993 ,1(1) :63 - 71.
- [5] L Helleman. A measure of computational work [J]. IEEE Trans on Computers. 1972 ,C-21 (5) :439 - 446.
- [6] M Nemani ,F N Najm. High-level area and power estimation for VLSI circuits [J]. IEEE Tran on CAD of Integrated Circuits and Systems , 1999 ,18(6) :697 - 713.

- [7] 朱宁 ,周润德 ,羊性滋. 考虑相关性的组合逻辑电路功耗分析 [A]. 第十届全国半导体集成电路/硅材料学术会论文集 [C]. 青岛 ,1997. 215 - 218.

作者简介:



张 盛 男,1975 年出生于重庆,清华大学微电子学研究所博士研究生,主要研究方向为低功耗及嵌入式系统 VLSI 设计方法学研究.

周润德 男,1945 年出生于上海,教授,清华大学博士生导师. 1986 年在波士顿大学电机系获电子工程博士学位. 主要研究方向为微处理器和微控制器设计,计算机体系结构, VLSI 设计方法学.

WWW.CNKI.NET