

# 数字电路仿真中的组合逻辑环路分析

邱伟博 陈逸华 朱青云

December 2024

## 1 赛题描述：

赛题要求在只有与门、非门、或门 和与非门 的组合逻辑之中，寻找所有强联通分量（最多有三个环路），分析环路能否振荡以及振荡条件，并讨论如何对环路进行改造，使得会振荡的 SCC 不会振荡并且功能基本与原来电路相同。赛题详细介绍见官方 PDF 文档。project 项目链接：<https://github.com/WebberQ/eda>

## 2 赛题一：找出测试用例中所有的强连通分量

在实践之中，组合逻辑环可能相互嵌套，形成强连通分量。赛题一要求找出组合逻辑之中所有的 SCC 的信号名称和逻辑门名称，可以参考寻找 SCC 的经典算法——Tarjan 算法实现。

## 3 赛题二 & 赛题三：找出不能起振的 SCC 和能起振的 SCC 的起振条件

SCC 内部可能起振，赛题二要求找出所有不能起振的 SCC，赛题三要求找出能够起振的 SCC，并给出必要的 SCC 起振条件；

起振条件是 SCC 内有奇数个非的环路，并且环路外部输入不能使得该环路锁定，即与门和与非门负反馈环路外部的输入必须是 1，或门必须是 0。首先用 Johnson 算法判断出有多少环路，并标记每个门位于哪些环路之中；根据每个 SCC 环路的多少（单环、双环或者三环），进行分类讨论。

### 3.1 单环：

单环起振较为简单，只需使得负反馈环路外部的输入满足条件即可。

### 3.2 双环:

判断双环每个环之中取反的数量,分为一个负反馈环、两个负反馈环和没有负反馈环三种情况。双环情况下我们的算法能够实现找出尽可能多的起振条件,在原题目要求上有所拓展。

(1) 没有负反馈环不会起振;

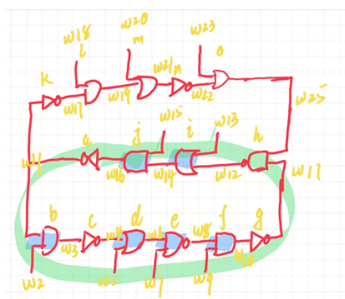
(2) 若有一个负反馈环,该环作为目标环,搜索目标环外的输入,使其能锁定(与门和与非门锁定为 1,或门锁定为 0)则能保持振荡,如果直到返回到该目标振荡环都不能锁定,则不能振荡;

(3) 两个负反馈的环,不考虑延迟情况下假定两个环同时起振,将所有外部输入条件。然后再考虑输出单个环起振,与上一种情况相同分析方法。

编写样例测试代码在三种情况下的运行,完全正确。

**示例:**

输入电路图:



可见该电路结构含一个负反馈环路,能够起振,振荡条件有

Loop Condition:  $b.port2=1, d.port2=0, e.port2=1, f.port2=1, i.port1=0, j.port1=1, o.port1=1$

Loop Condition:  $b.port2=1, d.port2=0, e.port2=1, f.port2=1, i.port1=0, j.port1=1, l.port1=0, m.port1=0, o.port1=0$

### 3.3 三环:

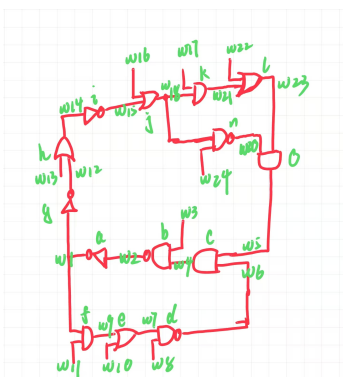
(1) 三个负反馈环,不考虑延迟,认为全部震荡;

(2) 一个负反馈环,搜索需要固定的输入,直到返回到该目标环。由于采用贪心搜索,结果正确率有所损失;

(3) 两个负反馈环,首先将两个振荡环视为一个整体,搜索该整体的外部输入保持锁定的条件;如果两个环不能一起起振,则再搜索是否能够单个环起振。同样由于贪心搜索,正确率有所损失;

编写样例测试运行三种情况,符合预期。

示例:



该电路图有两个反馈环，程序输出结果显示可以振荡，振荡条件为：

Loop Condition:  $b.port1=1, d.port2=1, e.port2=0, f.port2=1, h.port1=0, j.port1=0, l.port1=1, n.port2=1$

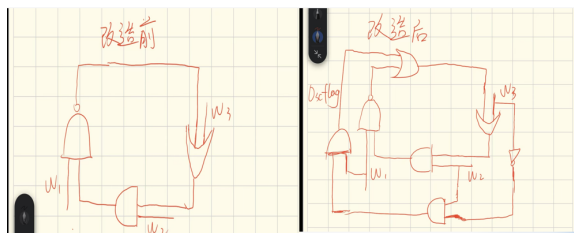
可见，两个负反馈环能够同时起振；

#### 4 赛题四：插入最少寄存器断开组合逻辑环

采用贪心算法，记录每个门位于多少个可震荡的逻辑环上，在数量最多的门输出信号线上插入寄存器，插入后更新可震荡的逻辑环，重复以上过程直到所有可震荡的逻辑环都被断开；

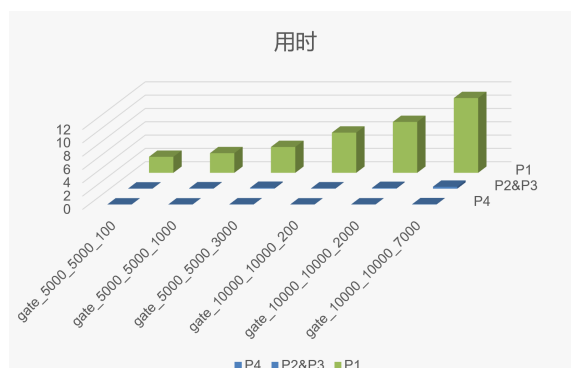
#### 5 赛题五：变换并简化逻辑环，能够检测震荡是否发生

假设有  $n$  ( $k_1, k_2, \dots, k_n$ ) 个环可以震荡，分别找出  $n, n-1, \dots, 2, 1$  个环发生震荡的条件，对其中包含  $k_j (j=1, 2, \dots, n)$  震荡的条件取并集即  $k_j$  的震荡条件。对这些震荡条件做逻辑变化，可以得到  $oscf1ag_1, oscf1ag_2, \dots, oscf1ag_n$ ，再用这些  $oscf1ag_1, oscf1ag_2, \dots, oscf1ag_n$  通过或门接入  $k_1, \dots, k_n$  环中，即可完成对电路的改造。而电路的  $oscf1ag$  即为  $oscf1ag_1, oscf1ag_2, \dots, oscf1ag_n$   $n$  个输入接入或门，即任何一个环震荡都认为电路会发生震荡。

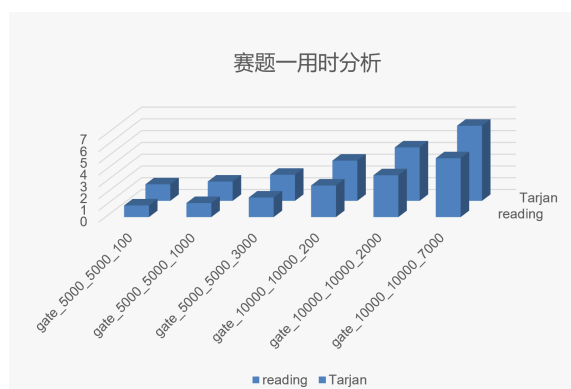


## 6 结果：

课上展示时老师提出测试用时太短不够准确，于是新添加了 gate\_10000\_10000 以及 gate\_5000\_5000 的几个例子进行测试，测试结果如下：



可见，最长时间为第一题用时，第二三四题用时较少。并且具体分析赛题一，我们发现用时最多的其实是 Tarjan 算法；



## 7 总结：

- (1) 采用 Tarjan 算法求解 SCC；
- (2) 采用分类讨论和 dfs 算法求解振荡条件，其中双环情况较原题有所提高，能够求解尽可能多的振荡条件；
- (3) 整体结果显示 Tarjan 算法用时较长，进一步可以研究如何更为有效构建 SCC；