

文章编号: 1001-0920(2007)08-0893-06

Q3 算法的改进及其在潜在通路分析中的应用

刘丙杰, 胡昌华, 叶雪梅, 蔡光斌

(第二炮兵工程学院 302 教研室, 西安 710025)

摘要: 为了克服基于定性仿真的潜在通路的局限性, 提出一种改进的 Q3 算法 (ImQ3), 并将其用于潜在通路分析 (SCA). ImQ3 对 Q3 算法作了 3 方面的改进: 定性状态描述的改进, 单调约束关系的改进以及步长精炼技术的改进. 分别用定性仿真, Q3 算法以及 ImQ3 算法对一个典型电路进行潜在通路分析. 统计结果发现, ImQ3 算法的正确率达到 98%.

关键词: 潜在通路分析; Q3 算法; 半定量仿真; 步长精炼技术; 定性状态

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Improvements of Q3 algorithm and its application in sneak circuit analysis

LIU Bing-jie, HU Chang-hua, YE Xue-mei, CAI Guang-bin

(Unit 302, Xi'an Institute of Hi-Tech, Xi'an 710025, China. Correspondent: LIU Bing-jie, E-mail: liubingjie@tom.com)

Abstract: To fully utilize quantitative information and discover more sneak circuits as possible, an improved semi-quantitative simulation (ImQ3) algorithm based on Q3 is introduced into sneak circuit analysis. The improvements of ImQ3 consists three aspects: Improvement of qualitative states description, monotonic constraint and step size refinement. ImQ3 predicts all functions of system using semi-quantitative model of system, and the sneak circuits are discovered by comparison predicted functions with designed functions under the same conditions. A typical example is used to test qualitative simulation, Q3 algorithm and ImQ3 algorithm respectively. The statistical result shows that the accuracy of ImQ3 is 98%.

Key words: Sneak circuit analysis; Q3 algorithm; Semi-quantitative simulation; Step size refinement; Qualitative state

1 引言

潜在通路分析 (SCA) 的发展已将近 40 年了. 目前, 潜在通路分析技术可分为全面的潜在通路分析和简化的潜在通路分析技术^[1]. 全面的 SCA 技术就是从制造级设计数据出发, 进行全面状态分析的方法, 即网络树、拓扑识别和线索表应用方法. 简化的 SCA 分为两种: 潜在路径分析和设计缺陷分析. 潜在路径分析是搜索出在“源点”和“目标点”之间的所有路径, 并对其应用两类线索以识别潜在路径; 设计缺陷分析则利用元件级线索识别设计缺陷, 它是潜在路径分析的一个补充. 文献[2-4]有关于两种 SCA 技术的详细描述.

定性仿真是 SCA 应用中的主要方法之一, 但定性仿真不能发现全部的潜在通路, 而且容易产生虚假报告, 主要是因为定性仿真丢失了大量的系统定

量信息. 为了充分利用定量信息, 在定性仿真算法的基础上, 很多学者提出了半定量仿真算法. 半定量仿真算法可同时利用定性、定量信息, 提高仿真精度, 文献[5]对半定量仿真作了综述.

Q3 算法是一种有效的半定量仿真算法, 它能有效利用系统的半定量信息. 本文在 Q3 算法的基础上提出一种改进的 Q3 算法, 将其用于 SCA, 以提高 SCA 的正确率.

2 Q3 算法

Berleant^[6,7]在定性仿真算法 (QSIM) 的基础上提出了 Q3 算法, 它利用数字区间表示不完全定量信息. Q3 算法首先建立系统的定性模型, 然后利用 QSIM 算法预测系统行为. Q3 算法将不完全信息表示为区间, 利用步长精炼技术以及相关的辅助技术 (如行为分割技术、目标间隔分割技术) 在 QSIM 产

收稿日期: 2006-04-25; 修回日期: 2006-10-26.

作者简介: 刘丙杰 (1979—), 男, 山西曲沃人, 博士生, 从事潜在通路分析、定性仿真等研究; 胡昌华 (1966—), 男, 湖北罗田人, 教授, 博士生导师, 从事潜在通路分析、故障诊断等研究.

生的定性状态中插入半定量状态,并利用信息传播方法传播定量信息,以达到提高仿真精度的目的。

定义1^[8] 路标值是指系统函数 f 上的重要点的集合. 函数 f 在这些点上的状态将发生变化. 每个函数都与一个有限路标值集合相对应.

定义2^[8] 假设 $t \in [a, b]$, 如果满足 $f(t) = x$, 且 x 为 f 的一个路标值, 则称 t 为 f 的可分时间点. 系统的可分时间点是所有函数的可分时间点的并集.

定义3^[8] 如果 $l_1 < l_2, \dots, < l_n$ 是函数 $f: [a, b] \rightarrow R$ 的路标值集合, $t \in [a, b]$, f 在时刻 t 的定性状态是一个二元组 $QS(qval, qdir)$, 其中

$$qval = \begin{cases} l_j, f(t) = l_j; \\ (l_j, l_{j+1}), f(t) \in (l_j, l_{j+1}); \end{cases} \quad (1)$$

$$qdir = \begin{cases} inc, f(t) > 0; \\ std, f(t) = 0; \\ dec, f(t) < 0; \end{cases} \quad (2)$$

$qval$ 表示变量幅值, $qdir$ 表示变量变化方向.

Q3 算法的步骤主要有:

1) 建立系统的定性模型. 在 QSIM 中, 利用定性约束关系表示系统的定性模型, 其中包括代数约束和定性约束.

2) 输入初始状态.

3) 根据状态转移规则产生后续状态.

4) 利用约束过滤、配对一致性过滤以及全局解释对状态进行过滤, 消除与实际不符的状态, 得到该状态的后续状态.

5) 利用 Q3 算法将半定量信息插入定性状态中, 逐渐减小仿真步长和状态区间.

6) 利用区间传播约束关系, 更新所有状态区间.

7) 对所有的后续状态重复步 3) ~ 6), 直到满足终止条件.

Q3 算法主要利用了步长精炼技术以及一些相关辅助技术, 如行为分割技术、目标间隔分割技术等. 步长精炼技术的关键是通过在已有的时间点之间插入新的时间点逐步减少时间步长. Q3 算法的目标就是尽可能多地插入行为. 为此, 需在相邻状态之间寻找间隔, 然后插入新的状态. 当没有间隔的情况下, 利用行为分割技术和目标分割技术人为制造一个间隔, 然后再利用步长精炼技术插入新的状态. 这样便可提高仿真精度. 当一个间隔缩小时, 其他相关联的间隔通过约束网络传播也会缩小.

3 Q3 算法分析

Q3 算法存在以下不足:

1) 定性状态描述方面的缺陷. Q3 算法的定性

状态描述为一个二元组 $QS(qval, qdir)$, 如式 (1), 式 (2) 所述. 其中状态幅值 $qval$ 描述系统函数的路标值, 主要包括区间端点函数值、区间内函数极值和函数的零值等. $qdir$ 用 3 个值仅描述了状态的变化方向, 并没有描述变化幅值, 因此丢失了很多必要信息. 在两个相邻的可区分时间点之间 $f(t)$ 不通过路标值, 所以 $f(t)$ 不会改变符号, 函数的定性状态为常量. 如果 $a < t_i < t_{i+1} < b$ 是 $f(t)$ 的两个可区分时间点, 则对任意的 $p, q \in (t_i, t_{i+1})$, 有 $QS(p, f) = QS(q, f)$, 即两个相邻路标值之间的定性状态是常量. 但当关于 $qdir$ 的定量信息可用时, $qdir$ 却不能有效描述定量信息.

2) $M+(f, g)$ 和 $M-(f, g)$ 的定义缺陷. $M+(f, g)$ 表示 f, g 在一定区间内具有相同的变化方向, 即: 当 $f > 0$ 时, $g > 0$; 当 $f < 0$ 时, $g < 0$. $M-(f, g)$ 表示 f, g 在一定区间内具有相反的变化方向, 即: 当 $f > 0$ 时, $g < 0$; 当 $f < 0$ 时, $g > 0$. 当 f, g 的形式比较明确时, 仅描述 f, g 的变化方向的大小就会丢失很多信息, 降低了仿真精度.

3) 步长精炼技术(SSR)的不足. 步长精炼技术首先要找到一个时间空隙, 如 $T_i = [t_i, \bar{t}_i]$, $T_{i+1} = [t_{i+1}, \bar{t}_{i+1}]$, 当 $\bar{t}_i < t_{i+1}$ 时, 在 T_i 和 T_{i+1} 之间存在一个空隙. 如果没有空隙, 应利用辅助技术创造一个空隙, 然后在这个空隙中插入一个时间点 t^* . t^* 按照以下原则选择^[7]: t^* 应有利于状态的可视化, 避免产生拥挤状态; t^* 应是一个整数. t^* 的选择有很强的主观性, 精度难以控制. 需要注意的是, t^* 是一个时间点, 而不是一个时间区间, 这样会带来两个缺陷: t^* 不可能覆盖所有时间点, 有可能漏掉某些关键时间点的状态; 当不关心 t^* 时刻的状态时, t^* 的插入会增加计算代价.

针对上述缺陷, 本文提出对 Q3 算法 3 个方面的改进.

4 Q3 算法的改进

为便于表述, 称传统的 Q3 算法为 CQ3, 本文提出的改进 Q3 算法称为 ImQ3.

定义4 ImQ3 算法中, 系统的定性状态描述为 $ImQS = (qval, qdir)$, 其中 $qval$ 与 CQ3 算法表示方法相同, 用区间表示; $qdir$ 表示为区间的形式. 如 Q3 算法中, $QS = (temperature, qdir) = (1\ 000, 2\ 000, inc)$ 表示当前温度在 1 000, 2 000 范围内, 并且呈上升趋势. ImQ3 算法中, $ImQS = (temperature, qdir) = (1\ 000, 2\ 000, 20, 30)$ 表示当前温度在 1000, 2000 范围内, 并且上升的速度为 20, 30 /s. ImQ3 和 CQ3 的定性状态变化方向关系如表 1 所示.

表 1 ImQ3 与 CQ3 定性状态变化方向关系

ImQ3	CQ3
qdir = (0, +)	qdir = inc
qdir = (0, 0)	qdir = std
qdir = (-, 0)	qdir = dec

从表 1 可以看出, CQ3 中的定性状态变化方向是 ImQ3 中的一个特例, 因为 ImQ3 的定性状态变化方向包含了 CQ3 定性状态变化方向的所有值. 但 CQ3 的定性状态变化不能描述 ImQ3 所有的状态变化. ImQ3 与 CQ3 的定性状态描述对比如表 2 所示.

表 2 ImQ3 与 CQ3 定性状态变化方向转移表

ImQ3		CQ3	
0, +	0, +	inc	inc
0, +	0, 0	inc	std
0, 0	0, +	std	inc
0, 0	0, 0	std	std
0, 0	-, 0	std	dec
-, 0	0, 0	dec	std
-, 0	-, 0	dec	dec

假设函数 f 的两个定性状态为 $\text{ImQS}(i) = (\text{qval}(i), \text{qdir}(i))$, $\text{ImQS}(i + 1) = (\text{qval}(i + 1), \text{qdir}(i + 1))$, 二者的可区分时间点分别为 T_i 和 T_{i+1} , 那么存在以下关系:

$$\text{qdir}(T_i) = \frac{\text{qval}(T_{i+1}) - \text{qval}(T_i)}{T_{i+1} - T_i}, \tag{3}$$

$$\text{qdir}(T_i) = \text{qdir}(T_i) - \text{qdir}(T_i), \tag{4}$$

$$\text{qval}(T_{i+1}) = \text{qval}(T_i) + \text{qdir}(T_i)(T_{i+1} - T_i), \tag{5}$$

$$\text{qval}(T_{i+1}) = \text{qval}(T_{i+1}) - \text{qval}(T_{i+1}). \tag{6}$$

其中: $\text{qval}(T_{i+1})$ 为估计状态幅值, $\text{qdir}(T_i)$ 为估计状态变化幅值. 从式(3) ~ (6) 可以看出, 通过两个状态的关系, 可估计前一可分时间点的变化方向. 将估计的变化方向与原变化方向相交可得出新的变化方向, 这样就缩小了状态变化区间. 同样, 后一可区分点的状态幅值的区间范围也缩小了. 与 QS 相比, ImQS 有以下优势:

- 1) 状态描述更加精确;
- 2) 不仅可以利用状态转换表确定 qdir 的区间范围, 而且可以通过 qval 确定 qdir 的区间.

定义 5 ImQ3 算法中, 系统函数间的单调增减关系描述为 $M(s, \bar{s}, f, g)$, 其中 s, \bar{s} 表示 f, g 函数关系的上下界, 即 $g = (s, \bar{s}) * f$. 如 $s, \bar{s} = (0, +)$ 表示 f, g 是单调增的关系; $s, \bar{s} = (-, 0)$ 表示 f, g 是单调减的关系; $s, \bar{s} = (2, 5), g = (2, 5) * f$. CQ3 中的 $M_{\pm}(f, g)$ 是 $M(s, s, f, g)$ 的一个特例.

新的定义不仅包含了原有定义的内容, 而且增加了半定量信息.

$M(s, \bar{s}, f, g)$ 的过滤原则为: 假设 f, g 的当前状态为 $[\text{qval}f, \text{qdir}f], [\text{qval}g, \text{qdir}g]$, $\text{qdir}f = \text{qdir}f[s, \bar{s}]$. 如果 $\text{qdir}f - \text{qdir}g =$, 则滤掉与这两个状态组合有关的所有状态; 如果 $\text{qdir}f - \text{qdir}g = \text{qdir-new}$, 则

$$\begin{aligned} \text{qdir}g &= \text{qdir-new}, \\ \text{qdir}f &= (\text{qdir-new} / [s, \bar{s}]) - \text{qdir}f. \end{aligned} \tag{7}$$

例如: $\text{qdir}g = [600, 700], \text{qdir}f = [0, 5], [s, \bar{s}] = [20, 100]$, 则 $\text{qdir}f = [0, 500], \text{qdir}f - \text{qdir}g =$, 滤掉与这两个状态组合有关的所有状态. 如果 $\text{qdir}g = [300, 700], \text{qdir}f = [0, 5], [s, \bar{s}] = [20, 100]$, 则 $\text{qdir}f - \text{qdir}g = [300, 500]$, 故 $\text{qdir}g = [300, 500], \text{qdir}f = ([300, 500] / [20, 100]) - \text{qdir}f = [3, 5]$.

改进的步长精炼技术 (ImSSR) 如下: 假设函数 f 的两个定性状态为 $\text{ImQS}(i) = (\text{qval}(i), \text{qdir}(i))$, $\text{ImQS}(i + 1) = (\text{qval}(i + 1), \text{qdir}(i + 1))$, 二者的可区分时间点分别为 T_i 和 T_{i+1} , 仿真最小步长为 Δt , 则进行如下算法:

- 1) 如果 $\bar{t}_i < t_{i+1}$, 且 $|\bar{t}_i - t_{i+1}| < \Delta t$, 则不需要插入新的状态;
- 2) 如果 $\bar{t}_i > t_{i+1}$, 则不需要插入新的状态;
- 3) 如果 $\bar{t}_i < t_{i+1}$, 且 $|\bar{t}_i - t_{i+1}| > \Delta t$, 则需要插入新的状态, 插入新的时间区间为 $t^* = [\bar{t}_i, \bar{t}_i + \Delta t]$, 在此区间内, 函数 f 的定性状态为 $\text{ImQS}(t^*) = (\text{qval}(t^*), \text{qdir}(t^*))$, 其中

$$\begin{aligned} \text{qval}(t^*) &= \text{qval}(i) + \text{qdir}(i) \cdot t^*, \tag{8} \\ \text{qdir}(t^*) &= \text{qdir}(i); \tag{9} \end{aligned}$$
- 4) 将新的时间区间 t^* 与 T_{i+1} 重复进行步骤 1) ~ 3), 直到相邻时间点的长度小于 Δt .

如果存在 $|\bar{t}_i| > \Delta t$, 则将 T_i 分割为若干个小区间, 重复利用上述算法.

ImQ3 算法的具体步骤如下:

- 1) 建立系统的定性模型, 如 Q3 算法所述;
- 2) 获取系统函数的路标值和可分时间点;
- 3) 根据初始路标值, 利用状态转移表推理系统的后续状态;
- 4) 利用约束过滤、配对一致性过滤以及全局解释对状态进行过滤, 消除与实际不符的状态, 得到该状态的后续状态;
- 5) 利用式(3) ~ (6) 缩小状态区间;
- 6) 利用 ImSSR 插入新的状态;
- 7) 进行下一个可分时间点的状态转移, 直到完成最后一个可分时间点.

5 ImQ3 算法精度分析

一个系统是由多个具有各自路标值集合和可区分时间点集合的有理函数组成, 即 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. 系统 F 的可区分时间点是单个函数 f_i 的可区分时间点的并集, 系统的定性状态是由单个函数定性状态所组成的 n 元组^[6], 即

$$\begin{aligned} QS(F, t_i) &= \\ &\{QS(f_1, t_i), QS(f_2, t_i), \dots, QS(f_n, t_i)\}, \\ QS(F, t_i, t_{i+1}) &= \\ &\{QS(f_1, t_i, t_{i+1}), QS(f_2, t_i, t_{i+1}), \dots, \\ &QS(f_n, t_i, t_{i+1})\}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} QS(f_j, t_i) &= (qval(j), qdir(j), t_i), \\ QS(f_j, t_i, t_{i+1}) &= (qval(j), qdir(j), t_i, t_{i+1}). \end{aligned}$$

$qval(j)$ 区间长度为 $|qval(j)|$, 则系统在 t_i 时刻的仿真精度为

$$J(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |qval(j)|. \quad (10)$$

假设 CQ3 的定性状态为 $qval(j)$, ImQ3 的定性状态为 $qval_l(j)$, 由式 (3) ~ (6) 可知 $qval_l(j) = qval(j) \cap qval(j)$, 故 $qval_l(j) \subset qval(j)$, 即 $|qval_l(j)| \leq |qval(j)|$. 由此可知

$$J_l(j) \leq J(j), \quad (11)$$

其中 $J_l(j), J(j)$ 分别表示 j 时刻 CQ3 和 ImQ3 的系统状态误差.

由式 (7) 可知, ImQ3 算法中函数间的单调关系 $M(s, \bar{s}, f, g)$ 也对提高仿真精度作出了贡献. 因为 $qdir g \subset qdir f \cap qdir g$, 且 $qdir f \subset (qdir \text{-new} / [s, \bar{s}]) \cap qdir f$, 即通过函数间的约束关系, 函数的定性状态的变化方向区间范围缩小了, 利用式 (3) ~ (6) 可进一步缩小状态幅值区间范围.

ImSSR 对精度的贡献主要体现在仿真步长的应用. ImSSR 覆盖了仿真区间内的所有状态. 如果很小, 仿真精度会较高, 但计算代价会相应增加; 反之亦然.

6 电路的半定量模型

在文献 [9] 中, 电路被表示为用可变量性电阻表示的电阻网络, 电阻阻值为 $:0, l, (0 < l < \infty)$, 其中 $:0$ 表示短路, l 表示负载, ∞ 表示断路. 由于系统复杂性不断提高, 数字电路应用越来越广泛, 传统的定性电阻网络表示方法已不能满足需求. Snooke^[9] 提出了基于信号流的系统模型思想, 但没给出具体的建模过程和方法. 电压电流是电路系统的基本信号, 每个元件都有一定的电压电流关系. 本文利用元件的电压电流信号对电路建模, 元件之间的关系用约束关系描述.

定义 6 元件状态表示为 $QS \text{ qval}, qdir$, $qval$ 表示信号幅值, $qdir$ 表示信号变化方向, 二者均用区间表示. 如 $QS(v_0, v_1), (s_1, s_2)$ 表示元件电压为 (v_0, v_1) , 且变化速度为 (s_1, s_2) .

元件可表示为以电压电流为变量的某种约束关系, 约束关系用上述定性约束关系表示, 如电感可表示为 $DERIV(MULT)(u, 1/L, R), i$. 其中 u 为电压, L 为电感值, $R = u/L, i$ 为电流. 定性电阻网络可以看作是这种建模方法的一个特例, 如开关可表示为 $MULT(u, 1/i, R)$. 为了提高仿真效率, 可将电路元件分为几类, 每类各用一种通用模型表示, 这样可以达到模型通用的目的. 表 3 给出一些基本元件的半定量模型.

表 3 常见元件半定量模型及参数说明

元件	半定量模型	参数说明
电阻	$MULT(u, 1/i, R)$	R 表示电阻值
电感	$MULT(DERIV(i), 1/L, u)$	L 表示电感值
电容	$MULT(DERIV(u), C, i)$	L 表示电容值
开关	$MULT(u, 1/i, R)$	$i = 0$ 时表示开关打开, $i = \infty$ 时表示开关关闭
二极管	$MULT(u, 1/i, R)$	$i = 0$ 时表示电流为正, $i = \infty$ 时表示电流为负向

注: 元件的参数值用区间表示.

复杂元件的主要特点是元件内部模型复杂, 但可根据其输入输出关系建立功能模型. 复杂元件的功能总可以表示为真值表的形式, 然后利用文献 [10] 中面向分段函数的定性仿真对复杂元件建模.

复杂元件建模的另一个有效的方法是简化电路. 其主要方法有: 1) 将复杂元件简化为若干个简单元件的组合; 2) 忽略元件的某些复杂行为; 3) 将元件的复杂功能压缩为一个简单元件代表的功能; 4) 简化元件的复杂功能.

7 基于 ImQ3 算法的潜在通路分析

Q3 算法应用于潜在通路分析的主要任务是预测系统实现的功能, 但 Q3 算法只能预测系统元件的状态, 所以必须将元件状态和功能联系起来. 元件状态与功能之间的关系可用规则的形式描述, 如: 如果元件电压 (或电流或电压电流之间的关系) 满足一定条件, 则实现相应功能. 根据元件状态与功能之间的关系建立规则库.

定义 7 功能元件是指该元件的状态发生变化时, 会导致系统的一个或多个功能发生或禁止.

一个电路的元件数量通常较多, 设计人员往往仅关注其中的功能元件状态. 所以, 只要确定功能元件的状态即可, 而不必确定每一个元件的状态.

定义 8 设计矩阵 $A = [A_1, B]$, $A_1 (a_{ij})$ 表示在第 i 种条件组合下, 系统功能 j 的实现状态, 且 $a_{ij} \in [0, 1]$, $a_{ij} = 0$ 表示功能 j 没有实现, $a_{ij} = 1$ 表示功能 j 实现; $B(b_{ik})$ 表示第 i 种条件组合中第 k 个条件的状态, $b_{ik} = 0$ 表示第 i 种条件组合中第 k 个条件不满足, 否则, $b_{ik} = 1$.

基于 ImQ3 算法的 SCA 具体步骤如下:

- 1) 建立系统的定性模型. 利用定性仿真的约束关系对元件分类, 对每一类建立相同的模型, 可以达到模型重用的目的.
- 2) 输入设计矩阵, ImSSR 仿真步长, 系统功能元件状态功能规则库, 系统半定量模型等.
- 3) 对某一开关状态组合, 利用 QSIM 算法预测系统行为, 主要是预测关键元件的电压电流. 利用状态转移规则预测元件状态, 直到状态达到稳定.
- 4) 利用约束关系和过滤技术过滤矛盾行为.
- 5) 利用 ImSSR 算法缩小小变量区间.
- 6) 利用元件状态功能库找到功能元件实现的功能, 并与设计功能对比, 找到潜在通路.
- 7) 重复步 3) ~ 6), 遍历所有开关组合.

8 仿真实例

图 1 为美国红宝石火箭发射电路图^[3]. 设计功能是当点火开关闭合后, 尾部脱落插头和尾部接地插头同时断开, 完成点火. 此电路还可进行紧急关机. 在成功发射了 50 次以后, 由于尾部接地插头较尾部脱落插头早断开 29 ms, 在第 51 次发射时出现了火箭点火后又关机, 使得火箭落回发射台. 这是一个典型的由于潜在通路引起的事故, 图中虚线表示潜在通路. 其设计功能和开关状态对应关系如表 4 所示, 元件状态与实现功能的对应关系如表 5 所示.

点火开关打开时, 关机线圈接通, 其半定量模型为 $MULT(u, 1/R, i)$, 其中 R 为线圈的半定量电阻, u 为线圈电压 28 V, i 为线圈电流.

点火开关闭合时, 根据经验可知, 两个插头拔出的时间差为 $t \in [-50, 50]$ ms. 此时存在 3 种情

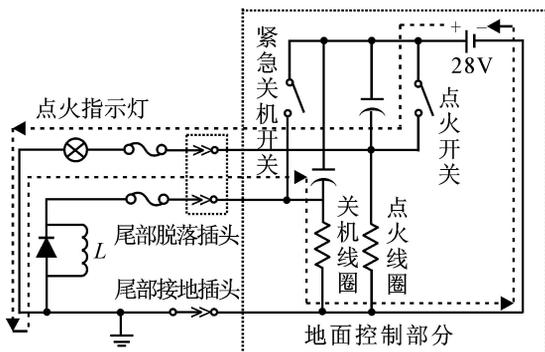


图 1 美国红宝石火箭发射电路图

表 4 设计功能与开关状态关系表

设计功能	对应元件状态	开关状态
点火	点火线圈接通	点火开关闭合

表 5 元件与其实现功能关系表

元件名称	状态	实现功能
点火线圈	$u = 28\text{ V}$	点火
关机线圈	$u = 28\text{ V}$	关机

况:

- 1) 尾部脱落插头和尾部接地插头同时拔出, $t \in [0, 0]$ ms, 点火线圈接通, 系统模型为 $MULT(u, 1/R, i)$;
- 2) 尾部脱落插头早于尾部接地插头拔出, $t \in (0, 50]$ ms, 点火线圈接通, 系统模型为 $MULT(u, 1/R, i)$;
- 3) 尾部脱落插头晚于尾部接地插头拔出, $t \in [-50, 0]$ ms, 点火线圈接通, 且关机线圈可能接通, 系统模型为

$$MULT(u_1, 1/R_1, i_1),$$

$$MULT(u_2, 1/R_2, i_2),$$

$$MULT(DERIV(i_2, 1/L), u_2).$$

仿真步长 = 2 ms. 为使仿真结果更加客观, 利用 ImQ3 算法进行了 100 次 SCA 实验, 结果发现: 第 1, 2 种情况不可能发生潜在通路; 第 3 种情况则可能发生潜在通路, 即当二者拔出的延迟时间大于电感线圈的延迟时间时, 就会发生潜在通路. ImQ3 算法的正确率达到 98%. 但当仿真步长增大时, ImQ3 算法的正确性就会随之降低.

利用纯定性仿真对图 1 所示电路进行潜在通路分析. 首先建立系统的定性电阻网络建模, 然后找到系统的所有电源到地的路径, 根据元件的状态判断系统实现的功能. 定性仿真实验进行了 100 次, 统计结果为: 由于定性电阻网络忽略了系统的半定量信息, 系统模型无法反映两个插头拔出的时间差以及线圈的延迟, 所以无法识别潜在通路.

利用 CQ3 算法对系统进行仿真, 半定量模型和 ImQ3 算法相同, 只是 CQ3 算法的精度不能满足要求, 步长精炼技术插入的时间点不确定. 利用 CQ3 算法进行了 100 次相同的实验, 正确率仅为 30%.

因为电感线圈 L 的不同参数值以及两个插头拔出时间差也是一个随机值, 所以发生潜在通路的概率较小. 利用纯定性仿真方法则无法利用这些信息, 所以不能发现潜在通路. 而 CQ3 算法的精度不高, 也可能导致发现不了潜在通路. 所以, 这种隐藏在电路中的潜在通路只有通过定量方法或半定量方法才能找到.

9 结 语

ImQ3 算法在 CQ3 算法的基础上进行了改进, 主要包括对定性状态描述、单调约束关系以及步长精炼技术的改进. 理论分析和实例都证实了改进的有效性. 此方法的优势在于可以同时利用定性信息、定量信息以及半定量信息, 而且可在电路设计的任意阶段进行, 有利于减小修改代价. 仿真实例证实了 ImQ3 算法在 SCA 中应用的可行性. 关于系统半定量模型的自动生成则是需要进一步研究的问题.

参考文献(References)

- [1] 李学锋, 钱玲. 航天控制系统潜在分析技术应用研究[J]. 航天控制, 2000, 18(1): 32-35.
(Li Xue-feng, Qian Ling. Sneak circuit analysis and its application in astronautic systems [J]. Aerospace Control, 2000, 18(1): 32-35.)
- [2] Christopher J Price. Effective automated sneak circuit analysis [C]. 2002 Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium. Washington: IEEE Press, 2002: 356-360.
- [3] Price C J, Snooke N, Landry J. Automated sneak identification [J]. Artificial Intelligent, 1996, 9(4): 423-427.
- [4] Price C J. AutoSteve: Automated electrical design analysis [C]. 14th European Conf on Artificial Intelligent. Berlin: Humboldt University, 2000: 456-460.
- [5] 刘丙杰, 胡昌华, 蔡光斌. 半定量仿真综述[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 1-6.
(Liu Bing-jie, Hu Chang-hua, Cai Guang-bin. Survey of semi-quantitative simulation [J]. J of System Simulation, 2006, 18(9): 1-6.)
- [6] Daniel Berleant. The use of partial quantitative information with qualitative reasoning [D]. Austin: University of Texas, 1991.
- [7] Daniel Berleant, Benjamin Kuipers. Qualitative and quantitative simulation: Bridging the gap [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetic, 1992, 22(4): 1-41.
- [8] 涂永忠, 白方周, 方瑾, 等. 一种高效的并行定性仿真方法: TPQSIM [J]. 计算机学报, 2000, 23(5): 459-469.
(Tu Yong-zhong, Bai Fang-zhou, Fang Jin, et al. A high performance method for parallel qualitative simulation [J]. Chinese J of Computers, 2000, 23(5): 459-469.)
- [9] Neal Snooke, Chris Price. Challenges for qualitative electrical reasoning in automotive circuit simulation [C]. 1998 Proc Annual Reliability and Maintainability Symposium. California, 1998: 356-360.
- [10] 邵晨曦, 张琪, 白方周. 面向分段函数的定性仿真算法 PQSIM 及其在脑电图研究中的应用 [J]. 计算机学报, 2001, 24(12): 1287-1293.
(Shao Chen-xi, Zhang Qi, Bai Fang-zhou. A qualitative simulation algorithm for the system with piecewise functions- PQISM and its application in the research of EEG [J]. Chinese J of Computers, 2001, 24(12): 1287-1293.)
- [5] Vukosavic S N, Stojic M R. Suppression of torsional oscillations in a high-performance speed drive [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(1): 108-117.
- [6] Koikeda H, Morimoto S, Takeda Y. Design of disturbance observer filter based on H control theory [C]. The 33rd IAS Annual Meeting Conf Record of the 1998 IEEE. Tokyo, 1998, 1: 401-404.
- [7] Yoshihiro Matsui, Hideyuki Nishida, Yuji Todaka. Design of speed controllers to suppress torsional vibrations based on frequency characteristics [C]. Proc of IEEE. Kohala, 1999: 255-260.
- [8] Butler D H E. Compensation of a digitally controlled static power converter for the damping of rolling mill torsional vibration [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1992, IA-28(2): 427-433.
- [9] Zhang G, Furusho J. Speed control of two-inertia system by PVPID control [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(3): 603-609.
- [10] Damir Filipovic, Dierk Schroder. Control of vibrations in multi-mass systems with locally controlled absorbers [J]. Automatica, 2001, 37(8): 213-220.
- [11] Garcia C E, Prett D M, Morari M. Model predictive control: Theory and practice [J]. Automatica, 1989, 25(3): 335-348.
- [12] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, et al. Constrained model predictive control: Stability and optimality [J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [13] Fukushima Hiroaki, Bitmead Robert R. Robust constrained predictive control using comparison model [J]. Automatica, 2005, 41(1): 97-106.
- [14] Schittkowski K. NLPQ: Design, implementation and test of a nonlinear programming algorithm [M]. Germany: University Stuttgart, 1984.

(上接第 892 页)