

# 基于比较的一种定性仿真方法

顾宇红 石纯一

(清华大学计算机系 北京 100084)

(汕头大学计算机科学研究所 汕头 515063)

**摘要** 基于比较的定性仿真是研究当动力学系统模型内部受到参数扰动或初始状态有所变化后,其定性行为如何变化,并给出因果解释.本文在 Weld, Neitzke 和 Neuann 的研究基础上,提出了一种基于比较的定性仿真方法 CQSIM,该方法利用观察标准来实现一致部分的比较,建立一个或多个偏差共同作用的比较仿真并分析行为的拓扑变化.

**关键词** 比较仿真,观察标准,偏差.

在研究动力学系统行为仿真时,人们注意到在故障诊断、系统分析和系统设计过程中,常常需要预测由系统变化(偏差)而产生的系统行为变化.<sup>[1]</sup>人们的目的不是简单地给出变化后系统的行为序列,而是需要找出变化前后 2 个行为序列的差别.从而提出基于比较的定性仿真,刻画如下:

已知:(1)参考系统(变化前系统)模型,(2)初始状态描述,(3)参考系统行为序列(对参考系统的仿真结果),(4)系统偏差描述(参考系统内部参数或初始状态受扰动情况).

寻求:(1)扰动系统(变化后系统)行为序列,(2)行为偏差,(3)因果解释.

预测行为偏差的过程中存在许多困难:

(1)参考系统行为序列以时间  $t$  为参数,而系统偏差可能影响进程的持续时间,因此以时间为观察标准的逐点比较往往既没有意义又无法进行.例如,无摩擦弹簧振子系统(如图 1 所示), $f = m \times a$ ,  $f = -k \times x$ ,  $m, k$  为常数,  $v = dx/dt$ ,  $a = dv/dt$ . 若振子质量  $m$  增加,则振动周期变长,同一时刻 2 系统中的振子不在同一位置甚至可能出现参考系统中振子已越过平衡位置,而扰动系统的振子还在  $(x_1^*, 0)$  区间内. 因此如何寻找合适的观察标准,尽可能地一致部分的比较是一个重要问题.

(2)当多个参数扰动共同作用时,可能导致冲突的结果.例如, $f = a \times b$ ,  $a, b$  一个变大而另一个变小,这时  $f$  将如何变化是一个有待解决的问题.

(3)系统偏差还可能导致诸如参数方向变化或主要行为的顺序变化等,这会使行为描述的结构(行为拓扑)变化.<sup>[2]</sup>例如,水泵向水箱注水(如图 2 所示),水泵的水压越低则注水过

\* 作者顾宇红,女,1971年生,博士生,要研究领域为人工智能应用基础.石纯一,1935年生,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能应用基础,知识工程.

本文通讯联系人:顾宇红,北京 100084,清华大学计算机系

本文 1996-01-12 收到修改稿

程越长(水泵的水压高于水箱的水压),但如果水泵的水压太低时,水流的方向会发生改变,水箱的水将减少直至两者水压相等。

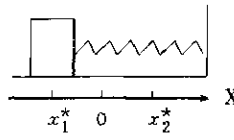


图1 无摩擦弹簧振子系统

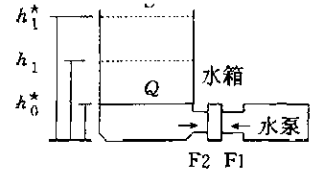


图2 水箱注水系统

问题(1)已由 Weld 提出的“perspect”概念<sup>[2]</sup>解决,但仍存在缺陷;问题(2)尚未解决;问题(3)已由 Michael Neitzke 和 Bernd Neumann 提出的 RSIM+<sup>[1]</sup>解决。本文以 RSIM+ 为基础,建立 CQSIM 算法,给出:

- (1)寻找合适的观察标准,实现一致部分的比较;
- (2)一个或多个偏差共同作用的比较仿真;
- (3)行为拓扑变化的处理。

## 1 概念定义

本文仍沿用 Kuipers 的 QSIM<sup>[3]</sup>中的一些符号表示:

(1)设  $P_0 < \dots < P_k$  是参数  $P(t)$  的界标值,  $P(t)$  在时间  $t$  的定性值和方向为:

$$qval(P, t) = \begin{cases} P_j & \text{如果 } P(t) = P_j \\ (P_j, P_{j+1}) & \text{如果 } P(t) \in (P_j, P_{j+1}) \end{cases} \quad qdir(P, t) = \begin{cases} inc & \text{如果 } dP/dt > 0 \\ std & \text{如果 } dP/dt = 0 \\ dec & \text{如果 } dP/dt < 0 \end{cases}$$

而  $P(t)$  在时间  $t$  的状态为:  $QS(P, t) = \langle qval(P, t), qdir(P, t) \rangle$

$P(t)$  在时间区间  $(t_i, t_j)$  的定性值为:

$$qval(P, t_i, t_j) = \begin{cases} P_j & \text{如果 } t \in (t_i, t_j), P(t) = P_j \\ (P_j, P_{j+1}) & \text{如果 } t \in (t_i, t_j), P(t) \in (P_j, P_{j+1}) \end{cases}$$

$P(t)$  在时间区间  $(t_i, t_j)$  的定性方向和状态定义与之类似。

(2)参数  $P(t)$  的行为定义为一个状态序列:

$$QS(P, t_0), QS(P, t_0, t_1), QS(P, t_1), \dots, QS(P, t_{n-1}, t_n), QS(P, t_n)$$

其中  $t_0, t_1, \dots, t_n$  为  $P$  的时间区分点(在该时刻  $P$  的定性状态发生改变)。

(3)当  $qval$  到达或离开一个界标值时,称参数发生了转移(Transition)。当有一个参数发生转移时,称该系统发生转移,每一个时间区分点标志了一个转移。

(4)行为转移序列由  $\{r_1, r_2, \dots\}$  表示,每个行为有一时间函数  $T$ ,把行为转移映射到相应的时间区分点。

### 1.1 偏差描述

与 QSIM 相同, CQSIM 要求每一个物理量(参数)都是时间的有理函数。为了区别于扰动系统与参考系统中的同一参数,沿用 RSIM+ 的办法,将后者加下标“ref”。

定义 1. 令  $f$  为系统参数,则  $f(t)$  不同于  $f_{ref}(t)$  的程度:

$$p(f, t) = f(t) / f_{ref}(t) \quad \text{称为参数 } f \text{ 在时间 } t \text{ 的 } P \text{ 值。}$$

这里  $P$  值是相对的但不是定性的,我们只对  $P$  值的定性性质感兴趣,因此不需要  $P$  的确切值,  $P$  值的定性范围由函数  $PQ$  得到。

定义 2.  $PQ(f, t) = TL ::= 0 < p(f, t) < 0.5$

$$PQ(f,t)=BL::=0.5\leq p(f,t)<1$$

$$PQ(f,t)=N::=(p(f,t)=1)\vee(f(t)=f_{ref}(t)=0)$$

$$PQ(f,t)=BG::=1<p(f,t)\leq 2$$

$$PQ(f,t)=TG::=p(f,t)>2$$

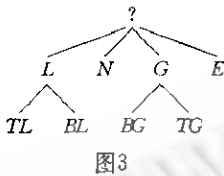
$$PQ(f,t)=L::=0<p(f,t)<1 \quad \text{即 } PQ(f,t)=TL\vee BL$$

$$PQ(f,t)=G::=p(f,t)>1 \quad \text{即 } PQ(f,t)=TG\vee BG$$

$$PQ(f,t)=E::=p(f,t)\leq 0$$

若  $PQ^* \in \{TL, BL, N, BG, TG, L, G, E\}, \forall t \in (T(r_i), T(r_j)) \cap (T_{ref}(r_i), T_{ref}(r_j))$ , 有  $PQ(f,t)=PQ^*$ , 则  $PQ(f, T(r_i), T(r_j))=PQ^*$

这 8 个 PQ 值把 P 值划分为 2 个层次的定性值, 如图 3 所示.



定义 1、2 采用了 RSIM+ 中用商表示偏差的思想, 并且比 RSIM + 更适于偏差比较. 它可以根据不同的需要, 选择不同层次(粒度)的 PQ 值进行仿真. 例如单纯地把 PQ 值定义为  $\{L, N, G, E\}$ , 那么对于  $h(t)=g(t) \times f(t), PQ(f,t)=L, PQ(g,t)=G$ , 则无法确定  $h(t)$  的 PQ 值. PQ 值为 E 是一种特殊情况, 这时 2 个系统该参数的定性状态

不同, 出现行为拓扑变化.

### 1.2 观察标准

扰动系统与参考系统的行为偏差应着眼于“一致行为片段”的比较, 从而准确抓住两者的差别.

定义 3. 令  $S_{ref}, S$  分别为参考和扰动系统,  $r_i, r_{i+1}$  为连续的 2 个行为转移,

若  $QS(S, T(r_i))=QS(S_{ref}, T_{ref}(r_i))$ , 则称  $r_i$  为一致行为点;

若  $QS(S, T(r_i), T(r_{i+1}))=QS(S_{ref}, T_{ref}(r_i), T_{ref}(r_{i+1}))$ , 则称  $(r_i, r_{i+1})$  为一致行为片段.

值得注意的是一致行为片段的起始、终止可能各不相同, 并且持续时间也未必相等, 因此以时间为观察标准的逐时间点比较毫无意义. 在许多情况下, 我们需要选择其它观察标准.

定义 4. 令  $A$  为系统参数集,  $x \in A, r_i$  为任意一行为转移, 若满足以下条件, 则称  $x$  从  $r_i$  起为观察标准:

(1)  $qdir(x, T(r_i), T(r_{i+1})) \neq std$ , (2)  $PQ(x, T(r_i))=N$ , (3) 若对原参数方程经  $\omega$  步变换 ( $\omega \leq \delta, \delta$  为常数), 使  $\forall y, y \in A - \{x\}, y$  均可表示为  $x$ , 或  $x$  的导数的函数.

这里  $\delta$  可以根据具体应用而设置, 用于当系统参数较多时, 控制寻找观察标准的时间, 以便提高效率.

定义 5. 令  $x$  为观察标准,  $x=g(t), \{r_0, \dots, r_k\}$  为行为转移序列,  $T$  为时间函数, 若  $TX(r_i)=g(T(r_i)) (0 \leq i \leq k)$ , 即  $TX$  把行为转移映射到相应的  $X$  区分点, 则称  $TX$  为关于  $x$  的转移函数.

进而把偏差定义扩展为对任一观察标准而言的偏差.

定义 6. 令  $f$  为系统参数,  $x$  为观察标准且  $f=f_x(x)$ , 则在同一  $x$  值,  $f$  不同于  $f_{ref}$  的程度:

$$p(f,x)=f_x(x)/f_{ref}(x)$$

称为  $f$  在  $x$  的  $P$  值.

$f$  在  $x$  以及在区间  $(TX(r_i), TX(r_j))$  的  $PQ$  值定义与定义 2 类似.

### 1.3 行为拓扑变化

行为拓扑变化指扰动系统的行为转移序列与参照系统的不同,可以通俗地理解为一定程度的量变将飞跃到质变.

定义 7. 令  $S_{ref}, S$  分别为参考和扰动系统, 设  $\{r_0, \dots, r_k\}$  为行为转移序列, 若  $\exists r_i, (0 \leq i \leq k)$ , 使  $r_i$  非一致行为点或  $(r_i, r_{i+1})$  非一致行为片段, 则称系统  $S$  发生行为拓扑变化.

## 2 比较仿真

### 2.1 特殊单调关系的表示

CQSIM 的偏差定义提供了描述多种单调关系的方法, 正如 RSIM+, CQSIM 不仅可表示 linear, overlinear, underlinear 关系, 也可表示 2 个单调关系之间的更平坦或更陡峭关系. 虽然 CQSIM 的  $P, PQ$  定义与 RSIM+ 不同, 但它们体现在上述特殊单调关系上的  $P, PQ$  关系与 RSIM+ 一致.<sup>[1]</sup>

### 2.2 偏差传播

偏差传播指从已知的扰动偏差开始, 应用约束规则, 通过状态内与状态间分析, 得到各参数在仿真各阶段相对于参考系统的改变情况.

下面介绍几条主要约束规则(要求所有函数为连续函数), 其中  $\{r_0, \dots, r_k\}$  为行为转移序列,  $t_i = T(r_i), x_i = TX(r_i), 0 \leq i \leq k$

$$(1) \text{包含规则 } (PQ(f, x) = BL) \vee (PQ(f, x) = TL) \Leftrightarrow PQ(f, x) = L \\ (PQ(f, x) = BG) \vee (PQ(f, x) = TG) \Leftrightarrow PQ(f, x) = G$$

#### (2) 乘法规则

令  $h, f, g, x$  均为系统参数,  $x$  为观察标准且在任一  $x$ , 都有  $h = f \times g$ , 则  $h, f, g$  在  $x$  处的  $P$  值,  $PQ$  值的部分约束关系见表 1(在区间  $(x_i, x_{i+1})$  上的约束关系与之类似).

加法规则比较简单, 不再介绍.

若  $PQ(f, x) = N$ , 则  $PQ(h, x) = PQ(g, x), p(h, x) = p(g, x)$ ;

若  $PQ(f, x) = E$ , (a) 若  $PQ(g, x) = E$ , 则  $p(h, x) \geq 0$ ; (b) 否则  $PQ(h, x) = E$ .

#### (3) 导数规则

$$(3.1) (Sign(x_i'', x_i, x_{i+1}) = +) \wedge (Sign(x_i', x_i, x_{i+1}) = +) \wedge (PQ(x, t_i) = N) \\ \wedge (PQ(x_i', x_i) = L \vee N) \wedge (PQ(x_i'', x_i) = L) \wedge (PQ(x_i'', x_i, x_{i+1}) = L) \\ \Rightarrow PQ(x_i', x_i, x_{i+1}) = L$$

$$(3.2) (Sign(x_i'', x_i, x_{i+1}) = +) \wedge (Sign(x_i', x_i, x_{i+1}) = +) \wedge (PQ(x, t_i) = N) \\ \wedge (((PQ(x_i'', x_i) = L) \wedge (PQ(x_i'', x_i, x_{i+1}) = L) \wedge (PQ(x_i', x_i) = L) \\ \wedge (PQ(x, t_{i+1}) = N) \vee ((PQ(x, t_{i+1}) = L) \wedge (PQ(x_i', x_i) = N) \wedge (PQ(x_i'', x_i, x_{i+1} + 1) = N)))) \\ \Rightarrow PQ(x_i', t_{i+1}) = L$$

表1 乘法约束规则  $h=f \cdot g \rightarrow PQ(g,t), |PQ(f,t)$

	TL	BL	L
TL	TL $p(h,x) < p(f,x) \wedge p(h,x) < p(g,x)$	TL $p(h,x) < p(f,x) < p(g,x)$	TL $p(h,x) < p(f,x) \wedge p(h,x) < p(g,x)$
BL	TL $p(h,x) < p(g,x) < p(f,x)$	L $p(h,x) < p(f,x) \wedge p(h,x) < p(g,x)$	L $p(h,x) < p(f,x) \wedge p(h,x) < p(g,x)$
L	TL $p(h,x) < p(f,x) \wedge p(h,x) < p(g,x)$	L $p(h,x) < p(f,x) \wedge p(h,x) < p(g,x)$	L $p(h,x) < p(f,x) \wedge p(h,x) < p(g,x)$
G	$(L \wedge p(h,x) > p(g,x)) \vee N \vee (G \wedge p(h,x) < p(f,x))$	$(BL \wedge p(h,x) > p(f,x)) \vee N \vee (G \wedge p(h,x) < p(g,x))$	$(L \wedge p(h,x) > p(f,x)) \vee N \vee (G \wedge p(h,x) < p(g,x))$
BG	L $p(g,x) < p(h,x) < p(f,x)$	$(BL \wedge p(h,x) > p(g,x)) \vee N \vee (G \wedge p(h,x) < p(f,x))$	$(L \wedge p(h,x) > p(g,x)) \vee N \vee (G \wedge p(h,x) < p(f,x))$
TG	$(L \wedge p(h,x) > p(g,x)) \vee N \vee (G \wedge p(h,x) < p(f,x))$	G $p(g,x) < p(h,x) < p(f,x)$	$(L \wedge p(h,x) > p(g,x)) \vee N \vee (G \wedge p(h,x) < p(f,x))$

	G	BG	TG
G	G $p(h,x) > p(f,x) \wedge p(h,x) > p(g,x)$	G $p(h,x) > p(f,x) \wedge p(h,x) > p(g,x)$	TG $p(h,x) > p(f,x) \wedge p(h,x) > p(g,x)$
BG	G $p(h,x) > p(f,x) \wedge p(h,x) > p(g,x)$	G $p(h,x) > p(f,x) \wedge p(h,x) > p(g,x)$	TG $p(h,x) > p(g,x) > p(f,x)$
TG	TG $p(h,x) > p(g,x) \wedge p(h,x) > p(f,x)$	TG $p(h,x) > p(f,x) > p(g,x)$	TG $p(h,x) > p(g,x) \wedge p(h,x) > p(f,x)$

(4) 积分规则

$$(PQ(x, t_i) = N) \wedge (PQ(x_i', t_i, t_{i+1}) = L) \wedge ((PQ(x_i', t_{i+1}) = L \vee N) \Rightarrow (PQ(x, t_i, t_{i+1}) = L) \wedge (PQ(x, t_{i+1}) = L)$$

(5) 持续时间规则

$$(PQ(x, t_i) = N) \wedge (PQ(x_i', x_i, x_{i+1}) = L) \Rightarrow (D(i, i+1) = G) \wedge (PQ(t, x_i, x_{i+1}) = G)$$

其中

$$D(i, i+1) = \begin{cases} G & T(r_{i+1}) - T(r_i) > T_{ref}(r_{i+1}) - T_{ref}(r_i) \\ N & T(r_{i+1}) - T(r_i) = T_{ref}(r_{i+1}) - T_{ref}(r_i) \\ L & T(r_{i+1}) - T(r_i) < T_{ref}(r_{i+1}) - T_{ref}(r_i) \end{cases}$$

(6) 常数规则

(6.1)  $qdir(k, t_i, t_{i+1}) = std \Rightarrow PQ(k, t_i) = PQ(k, t_i, t_{i+1}) = PQ(k, t_{i+1})$

(6.2)  $(qdir(k, t_i, t_{i+1}) = std) \wedge (x \in OC)$

$$\Rightarrow PQ(k, x_i) = PQ(k, x_i, x_{i+1}) = PQ(k, x_{i+1}) = PQ(k, t_i)$$

其中 OC 为观察标准集, k 为任意系统参数.

(7) 观察标准规则

$$x \in OC \Rightarrow (PQ(x, x_i) = N) \wedge (PQ(x, x_i, x_{i+1}) = N) \wedge (PQ(x, x_{i+1}) = N)$$

其中  $OC$  为观察标准集.

### (8) 单调规则

$$h \text{ 为严格单调增函数} \wedge (f(x) = h(g(x))) \wedge (x > 0) \wedge (f(x) > 0) \wedge (g(x) > 0)$$

$$\wedge (PQ(x, t_i) = N) \Rightarrow PQ(f, x_i, x_{i+1}) \approx PQ(g, x_i, x_{i+1})$$

其中  $\approx$  表示两边的  $PQ$  值同为  $L, G, N$ .

## 2.3 因果解释

因果解释的获得蕴含在转移规则中. 规则的前件为原因, 后件为结果. 在仿真过程中, 每当使用一条转移规则, 将实际参数代入规则的前、后件, 就可得到因果解释链. 例如, 将  $x$  表示位移,  $i=2$  代入积分规则, 其因果解释为: 在事件 2 发生时, 两系统位移相同, 在事件 3 到来之前扰动系统的速度小于参考系统, 且在事件 3 发生时扰动系统的速度不大于参考系统, 因此从事件 2 发生后到事件 3 发生时, 扰动系统的位移均小于参考系统位移, 即运动变慢.

## 3 CQSIM 工作流程

(1) 测试系统参数, 得到有序的观察标准集  $OC$ :

- a.  $OC = \emptyset$ ;
- b. 判断各参数是否符合观察标准定义, 若符合则加入  $OC$  并记下变换步数;
- c. 将  $OC$  中元素按其变换步数由小到大(优先级由高到低)排序;
- d. 若时间参数  $t \in OC$ , 则将  $t$  加入  $OC$  并令其优先级最低(在无观察标准时则以时间为标准);

(2) 若  $OC \neq \emptyset$ , 则选  $OC$  中优先级最高的元素  $x$ ,  $OC = OC - \{x\}$ ; 否则失败;

(3) 行为比较仿真:

- a. 以  $x$  为观察标准, 从当前状态开始, 应用转移约束规则, 进行行为的比较仿真;
- b. 仿真过程中, 每当到达一界标时检查参数方程是否改变, 若改变, 转(1);

(4) 若仿真进行到最后一个界标点, 则结束; 否则转(2).

该算法将以往的 2 类(选择观察标准和不选择观察标准)比较仿真方法统一起来, 它在不存在合适的观察标准时将自动以时间为观察标准进行行为的比较仿真, 这种情况  $RSIM + [13]$  中有所讨论. 这样不仅能通过合适的观察标准来简化仿真过程、刻画因果关系、模拟人类专家的推理思路, 而且可以确保在最差情况下仍不比其它仿真方法所得结果差.

## 4 举 例

### 4.1 选择观察标准, 实现一致部分的比较

无摩擦弹簧振子系统(如图 1 所示), 包含 6 个系统参数: 弹簧弹性系数  $K$ , 振子质量  $M$ , 位置  $X$ , 速度  $V$ , 加速度  $A$ , 弹力  $F$ , 其中  $K, M$  为常数. 满足如下约束关系:

$$A = dV/dt, V = dX/dt, F = M \times A, F = -K \times X, dM/dt = 0, dK/dt = 0$$

问“当振子质量  $M$  增加后, 弹簧振子的振动周期如何变化?”

求解步骤如下:

(1)确定 OC

由于已知初始条件  $PQ(X, t_0) = N, PQ(V, t_0) = N$ , 并且由状态内分析, 可知  $PQ(F, t_0) = N, PQ(A, t_0) = L$ , 又因为任何参数都可表示成  $x$  或  $F$  的函数(或其导数的函数), 所以,  $OC = \{X, F, t\}$ .

(2)令  $x$  为观察标准,  $OC = \{F, t\}$ .

(3)行为比较仿真

$r_0: \quad qual(X, t_0) = x_0 = x_1^*$

$qual(X, x_0, x_1) = (x_1^*, 0)$

$r_1: \quad qual(X, t_1) = x_1 = 0 \Rightarrow D(0, 1) = G$

$PQ(X, t_0) = N$
$PQ(K, x_0) = N (6.2)$
$PQ(M, x_0) = G (6.2)$
$PQ(A, x_0) = N (2)$
$Sign(V, x_0) = +$
$Sign(A, x_0) = +$
$PQ(V, x_0) = N$
$PQ(A, x_0) = L (2)$

$PQ(X, x_0, x_1) = N (7)$
$PQ(K, x_0, x_1) = N (6.2)$
$PQ(M, x_0, x_1) = G (6.2)$
$PQ(F, x_0, x_1) = N (2)$
$Sign(V, x_0, x_1) = +$
$Sign(A, x_0, x_1) = +$
$PQ(V, x_0, x_1) = L (3.1)$
$PQ(A, x_0, x_1) = L (2)$

$PQ(X, x_0) = N (7)$
$PQ(K, K_1) = N (6.2)$
$PQ(M, x_1) = G (6.2)$
$PQ(F, x_1) = N (2)$
$Sign(V, x_1) = +$
$Sign(A, x_1) = 0$
$PQ(V, x_1) = L (3.2)$
$PQ(A, x_1) = N (2)$

由于从已知的参考系统仿真过程可以发现这个运动过程的 4 个部分分析方法相同, 所以从  $D(0, 1) = G$  可知总周期必然变长.

4.2 多个偏差共同作用的比较仿真

仍以无摩擦弹簧振子系统为例, 问“当  $K$  增大一点, 而  $M$  增大很多时, 弹簧振子的振动周期如何变化?”

(1)确定 OC

由于  $PQ(K, t_0) = BG, F = -K \times X$ , 所以  $PQ(F, t_0) = BG$ , 从而  $F$  不再是观察标准,  $OC = \{X, t\}$ .

(2)令  $X$  为观察标准,  $OC = \{t\}$ .

(3)仿真

由于  $M, K$  同时变化, 导致  $M, F$  同时变化, 又因  $F = M \times A, PQ(F, x_0) = BG, PQ(M, x_0) = TG$ , 根据乘法规则, 可得初态为:

$$qual(X) = x_1^* \quad PQ(X, t_0) = N \quad PQ(K, x_0) = BG \quad PQ(M, x_0) = TG \quad PQ(F, x_0) = BG$$

$$Sign(V, x_0) = 0 \quad Sign(A, x_0) = + \quad PQ(V, x_0) = N \quad PQ(A, x_0) = L$$

从初态开始, 运用与上例类似的规则推导, 可得周期仍变长.

4.3 行为拓扑变化

我们用前文所述水泵向水箱注水为例说明这一问题.

该系统有 12 个系统参数: 水的密度  $\rho$ , 重力加速度  $g$ , 水箱截面积  $S$ , 水箱初始水位  $h_0^*$ , 水箱满水位  $h_1^*$ , 水泵压力  $F1$ , 平衡水位  $hb$ (以上均为常数), 水箱压力  $F2$ , 压力差  $F$ , 水位  $h$ , 水流量  $Q$ , 流速  $V$ . 满足如下约束关系:

$$F2 = \rho \times g \times h \times S \qquad F = F1 - F2 \qquad Q = (h - h_0^*) \times S$$

$$V = \underline{LINEAR}_0^+(F) \qquad V = dQ/dt \qquad hb = F1 / (\rho \times g \times S)$$

问“当水压变小时, 系统行为如何变化?”仿真过程如下:

(1)确定  $OC$ 

根据定义,  $OC = \{h, F2, Q, F, t\}$ ;

(2)令  $h$  为观察标准,  $OC = \{F2, Q, F, t\}$ ;

## (3)仿真

仿真初态如下:

$$PQ(F_1, h_0) = L \quad (6.2) \quad PQ(F_2, h_0) = N \quad (2) \quad PQ(hb, h_0) = L \quad (2)$$

$$PQ(Q, h_0) = N \quad (2) \quad PQ(F, h_0) = L \vee E \quad (2) \quad PQ(V, h_0) = L \vee E \quad (8)$$

$$Sign(F, h_0) = 0 \vee + \vee - \quad Sign(Q, h_0) = 0 \quad Sign(V, h_0, h_1) = 0$$

其中  $PQ(F, h_0) = L$  表示水泵压力仍高于水箱内水压(或两者已达到平衡)的情况, 仿真结果为水箱注水速度减慢直至平衡(或保持平衡);  $PQ(F, h_0) = L$  表示发生行为拓扑变化, 水从水箱流至水泵直至压力平衡.

## 5 结束语

现有多种基于比较的仿真方法: Weld 的 DQ 分析法<sup>[2]</sup>、夸张算法<sup>[4]</sup>、Neitzke 和 Neumann 的比较仿真(RSIM+)法<sup>[1]</sup>等. Weld 在 DQ 分析法中首先提出了“perspect”概念, 用以解决一致部分比较问题, 并指出比较仿真中存在“行为拓扑变化”, 但“perspect”概念定义范围太大, 从而无法充分体现选择观察标准的优越性, 并且未能处理“行为拓扑变化”. 夸张算法的基本思想是把偏差极限化, 这种方法直观易懂, 但存在严重缺陷: 仅限于处理单调系统. RSIM+ 则用同步来解决一致部分比较问题, 用  $P, PQ$  值来表示偏差, 可处理行为拓扑变化, 但该方法复杂且偏离人类专家分析问题的思路, 因果关系不清晰. 另外上述方法都无法处理多个相互冲突的扰动同时发生时偏差的比较问题.

CQSIM 综合并改进了 DQ, RSIM+ 方法. 它给出了“观察标准”定义使之较 DQ 方法更易于实现一致部分比较、贴近人类思维、给出合理的因果解释; 改进了 RSIM+ 中  $P$  值,  $PQ$  值的定义, 使之适应不同的观察标准及偏差比较; 改进并提出了一套约束规则.

CQSIM 尚不完善: 偏差比较限于乘法, 如何完善偏差描述, 使之适于加法及其它函数; 当不存在适当的观察标准时, 有可能失败, 此时还需要更多的规则指导比较仿真的顺利进行. 这些将是今后的研究方向.

## 参考文献

- 1 Neitzke Michael, Neumann Bernd. Comparative simulation. Proceeding of AAAI-94, 1994. 1205~1210.
- 2 Weld Daniel S. Comparative analysis. Artificial Intelligence, 1988, 36: 333~373.
- 3 Kuipers B. Qualitative simulation. Artificial Intelligence, 1986, 29: 289~338.
- 4 Weld Daniel S. Exaggeration. Proceeding of AAAI-88, 1988. 291~296.



## A METHOD OF COMPARISON-BASED QUALITATIVE SIMULATION

GU Yuhong SHI Chunyi

*(Department of Computer Science Tsinghua University Beijing 100084)*

*(Computer Science Institute of Shantou University Shantou 515063)*

**Abstract** The main purposes of comparison-based qualitative simulation are predicting the system's behavior deviations caused by perturbations in its parameters and the initial state and giving the explanation. This paper proposes a method of comparison-based qualitative simulation CQSIM. It is based on the achievements of Weld, Neitzke and Neumann. It implements the comparison of according parts with the suitable observation caliber, the qualitative simulation of one or more deviations and the analysis of changes in the behavioral topology.

**Key words** Comparison-based qualitative simulation, observation caliber, deviation.