

# 基于扩展变迁系统的分布式系统一致性测试研究

毕 军, 吴建平, 朱 江

(清华大学计算机系, 北京 100084)

摘 要: 本文用形式化技术给出分布式系统的一致性概念和测试结构, 并讨论基于扩展变迁系统描述的包含实现关系、测试例、测试集和测试执行的测试理论.

关键词: 计算机网络; 一致性测试; 分布式系统

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 0372 2112 (2000) 02 0130 03

## Research on Extended Transition Systems Based Conformance Testing for Distributed Systems

BI Jun, WU Jiarping, ZHU Jiang

(Department of Computer Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper proposes a formal test theory for conformance concepts and test architecture of distributed systems. More over the theory consisting of implementation relations, test cases, test suites, and test execution, with respect to Extended Transition System specifications, is presented.

Key words: computer networks; conformance testing; distributed systems

### 1 引言

形式化的一致性测试基于被测对象的形式化描述来清晰无二义性地讨论什么样的实现是一个一致性实现<sup>[1]</sup>. 随着形式化技术不断得到应用, 人们越来越注意一致性测试中的形式化方法. ISO/IEC 9646<sup>[2]</sup>给出协议测试的方法论, 但不能很好解决复杂分布式系统测试. 本文目的是用形式化的手段讨论分布式系统测试的概念和方法. 本文采用抽象的过程来分解分布式系统, 提出一个通用的分布式系统测试框架. 为了更清楚地表述这个框架, 本文进一步采用扩展变迁系统(Extended Transition System, ETS)来形式化地描述分布式系统中的实体, 并给出 ETS 表述的有关概念.

### 2 分布式系统的一致性测试

#### 2.1 一致性概念

定义 1  $DSSPECS$  是分布式系统实例化描述的集合.  $VPTSPECS_i$  是视点  $i$  的实例化描述的集合. 一个参数化的描述  $s_{pt_i}: D_{s_{pt_i}} \rightarrow VPTSPECS_i$  可以认为是从参数空间  $D_{s_{pt_i}}$  (形式参数的所有可能的实际值的集合) 到实例化描述空间  $VPTSPECS_i$  的函数.  $VPTRQS_i$  是基于需求描述语言的视点动态一致性描述, 实例化描述  $s_{pt_i}$  可表示为一个需求的集合  $R_{s_{pt_i}} \subseteq VPTRQS_i$ . 元素  $r_i \in R_{s_{pt_i}}$  表示某个动态一致性需要.  $VPTSPECS_i = \text{PowerSet}(VPTRQS_i)$ .  $ESPECS_{ij}$  是  $s_{pt_i}$  中实体  $e_j$  的实例化描述.

定义 2 关系  $s_{vpt} \subseteq VPTSPECS_i \times DSSPECS$ , 表示某视点描述属于某分布式系统描述, 对  $s_{DS} \in DSSPECS$ ,  $s_{pt_i} \in VPTSPECS_i$ , 如  $s_{DS} = \langle s_{pt_1}, \dots, s_{pt_i}, \dots, s_{pt_n} \rangle$ , 则  $s_{pt_i} s_{vpt} s_{DS}$ . 关系  $i_{vpt} \subseteq VPTMODES_i \times DSMODES$ , 表示某视点实现属于某分布式系统实现. 关系  $se_{in} \subseteq ESPECS_j \times VPTSPECS_i$ , 表示某实体描述属于某视点描述实现. 关系  $ie_{in} \subseteq EMODES_j \times VPTMODES_i$ , 表示某实体实现属于某视点实现.

定义 3 分布式系统的实现关系  $d_{simp} \subseteq DSMODES \times DSSPECS$ , 对  $s_{DS} \in DSSPECS$ ,  $i_{DS} \in DSMODES$ , 如  $\forall i_{pt_i} \in VPTMODES_i$ ,  $s_{pt_i} \in VPTSPECS_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $s_{pt_i} s_{vpt} s_{DS}$ ,  $i_{pt_i} i_{vpt} i_{DS}$ , 有  $i_{pt_i} i_{vpt} i_{DS}$ , 则  $i_{DS} d_{simp} s_{DS}$ .

定义 4 视点实现关系  $v_{ptimp_i} \subseteq VPTMODES_i \times VPTSPECS_i$ , 对  $s_{pt_i} \in VPTSPECS_i$ ,  $i_{pt_i} \in VPTMODES_i$ , 当且仅当  $(ICS_{i_{pt_i}} \in D_{s_{pt_i}}) \wedge (\forall r_i \in R_{s_{pt_i}}, R_{s_{pt_i}} \subseteq VPTRQS_i, i_{pt_i} v_{ptsat} r_i)$  时,  $i_{pt_i} v_{ptimp_i} s_{pt_i}$ .

该定义表明  $i_{pt_i}$  同时满足 ICS 表述的静态  $(ICS_{i_{pt_i}} \in D_{s_{pt_i}})$  和动态  $(\forall r_i \in R_{s_{pt_i}}, R_{s_{pt_i}} \subseteq VPTRQS_i, i_{pt_i} v_{ptsat} r_i)$  一致性需要.

定义 5 满足关系  $v_{ptsat_i} \subseteq VPTMODES_i \times VPTRQS_i$ , 对  $i_{pt_i} \in DSMODES_i$ ,  $\forall r_i \in R_{s_{pt_i}}, R_{s_{pt_i}} \subseteq VPTRQS_i$ , 当且仅当  $\forall se_j \in ESPECS_j$ ,  $s_{pt_i} \in VPTSPECS_i$ ,  $\exists ie_j \in EMODES_j$ ,  $se_j se_{in} s_{pt_i}$ ,  $ie_j ie_{in} i_{pt_i}$ ,  $ie_j e_{imp} se_j$  时,  $i_{pt_i} v_{ptsat} r_i$ .

**定义 6** 实体实现关系  $cinp_i \subseteq EMODES_i \times ESPECS_i$ , 对  $se_{ij} \in ESEPECS_{ij}$ ,  $ie_{ij} \in EMODES_{ij}$ , 当且仅当  $supt_i \in VPT-SPECTS_i$ ,  $upt_i \in VPTMODES_i$ ,  $supt_i = \langle sE_i, sD_i, sI_i, sB_i, sArch_i, sAct_i \rangle$ ,  $upt_i = \langle iE_i, iD_i, iI_i, iB_i, iArch_i, iAct_i \rangle$ ,  $se_{ij} \in sE_i$ ,  $ie_{ij} \in iE_i$ ,  $\forall i_{ijk} \in iI_i$ ,  $i_{ijk} \in iArch_i(i_{ij})$ ,  $ib_{ijk} \in iB_i$ ,  $ib_{ijk} = iAct_i(i_{ijk})$ ,  $\forall si_{ijk} \in sI_i$ ,  $si_{ijk} \in sArch_i(se_{ij})$ ,  $sb_{ijk} \in sB_i$ ,  $sb_{ijk} = sAct_i(si_{ijk})$ ,  $ib_{ijk} = sb_{ijk}$  时,  $ie_{ij} \underline{imp} se_{ij}$ .

**定理 1** 由上述定义我们可以推导出如下结论:  $inpsds \underline{simp} isds$ ,  $\text{iff } \forall vpt_i(ICSupt_i \in Dsupt_i) \wedge (\forall ie_{ij}, ib_{ijk} = sb_{ijk})$ . 因此一致性实现的集合定义为  $DSCONF_{SDS} = \{inps | inps \underline{simp} isds\} = \{isds | \forall vpt_i(ICSupt_i \in Dsupt_i) \wedge (\forall ie_{ij}, ib_{ijk} = sb_{ijk})\}$ . 它意味着我们可以通过测试一个实际分布式系统的每个抽象中的每个实体在其交互点上的外部行为来进行该分布式系统的一致性评价.

## 2.2 抽象测试结构和一致性评价过程

针对以上非形式化的分析, 现在给出测试结构的形式模型. 对于被测实体 (IUTE)  $ie_{ij} \in EMODES_{ij}$ , (因为测试系统可以抽象为测试集) 测试系统的形式描述可以通过测试集语言的集合  $CTTCN$  表示. 则  $ie_{ij}$  的测试集为  $Te_{ij} \in \text{PowerSet}(CTTCN)$ . 测试上下文是一个函数  $Ce_{ij}: EMODS_{ij} \rightarrow EMODS_{ij}$ .  $PCO$  和交互点可以形式化地模型为  $i_{ijk} \in iI_i$ ,  $upt_i = \langle iE_i, iD_i, iI_i, iB_i, iArch_i, iAct_i \rangle$ ,  $ie_{ij} \in iE_i$ ,  $i_{ijk} = iArch_i(ie_{ij})$ .

进一步讨论测试评价过程. 测试集  $Te_{ij}$  的执行是测试系统在  $ie_{ij}$  和  $Ce_{ij}$  中运行. 在一个测试例  $te_{ij} \in Te_{ij}$  运行中, 得到一个观察  $ote_{ij} \in OBSe_{ij}$ .  $OBSe_{ij}$  可以看作一个集合:  $\{ib_{ijk} \in iB_i | ib_{ijk} = iAct_i(i_{ijk})\}$ .

测试例的执行是测试集与模型  $Ce_{ij}(ie_{ij}) \in EMODES_{ij}$  (IUTE 处于测试上下文的模型中) 到观察的函数:  $exece_{ij} \subseteq Te_{ij} \times EMODES_{ij} \rightarrow OBSe_{ij}$ .

测试判决  $ote_{ij}$  是一个函数  $vdict_{te_{ij}}(ote_{ij}): OBSe_{ij} \rightarrow \{pass, fail\}$ .

IUTE“通过”一个测试例是一个关系:  $passte_{ij} \subseteq EMODES_{ij} \times Te_{ij}$ ,  $ie_{ij} \underline{passte}_{ij} te_{ij}$   $\text{iff } vdict_{te_{ij}}(ote_{ij}) = pass$ . 即  $\text{Then } ie_{ij} \underline{passte}_{ij} te_{ij}$   $\text{iff } vdict_{te_{ij}}(exece_{ij}(te_{ij}, Ce_{ij}(ie_{ij}))) = pass$ .

同样 IUTE“通过”一个测试集是一个关系  $passes a test suite$  is a relation  $passTe_{ij} \subseteq EMODES_{ij} \times \text{PowerSet}(CTTCN)$ ,  $ie_{ij} \underline{passTe}_{ij} Te_{ij}$   $\text{iff } \forall te_{ij} \in Te_{ij}$ ,  $ie_{ij} \underline{passte}_{ij} te_{ij}$ . 即  $\text{iff } \forall te_{ij} \in Te_{ij}$ ,  $vdict_{te_{ij}}(exece_{ij}(te_{ij}, Ce_{ij}(ie_{ij}))) = pass$ .

被测视点  $upt_i$ “通过”一系列测试集是一个单目关系  $passTVPT_i: upt_i \underline{passTVPT}_i$   $\text{iff } \forall ie_{ij}, ie_{ij} \underline{in} upt_i$ ,  $ie_{ij} \underline{passTe}_{ij} Te_{ij}$ .

最后, 被测分布式系统  $isds$ “通过”一系列测试集是一个单目关系  $passTDS: isds \underline{passTDS}$   $\text{iff } \forall upt_i, upt_i \underline{upt} of isds$ ,  $ie_{ij} \underline{passTe}_{ij} Te_{ij}$ .

## 3 基于 ETS 的一致性测试

上面在假定分布式系统得到了形式化描述基础上讨论通用的测试概念. 在本节中将上节的概念具体采用扩展变迁系统 ETS 来描述. ETS 可以提供系统的控制行为及数据的语义

模型.

**定义 7** 一个扩展变迁系统 ETS 是一个八元组  $\langle S, E, G, A, R, T, \Sigma(V), s_0, f_0 \rangle$ , 其中:  $S$  是 ETS 状态的集合;  $E \subseteq S \times I$  是 ETS 上扩展的有限集合.  $I$  是标志符的有限集合.  $G$  是 ETS 通信门径的有限集合.  $A$  是 ETS 动作的集合.  $R$  是 ETS 变迁关系的集合. 给定一个特征  $\Sigma$  和变量的集合  $V$ , 在  $\Sigma$  和  $V$  上顶的集合表示为  $T_{\Sigma}(V)$ .  $s_0$  是系统的初始状态.  $f_0$  是变量的初始赋值.

**定义 8** 动作是并发的集合. 行为  $b$  是  $G$  中的元素  $g$  和值或变量声明的列表.  $I$  是内部(不可观察的)事件.  $I$  中的元素表示为  $i_i$ .  $b$  的集合表示为:  $B = \{ \langle g_i, v_i, l_i, i_i \rangle | g_i \in G, v_i \in V, l_i \in T_{\Sigma}(V), i_i \in I \}$ , “ $!$ ”表示向外部环境输出值; “ $?$ ”表示变量的输入. 我们给出如下表示法: (1)  $b_1 \gg b_2 \gg \dots \gg b_n$ , 行为是顺序的. (2)  $b_1[] b_2[] \dots [] b_n$ , 行为是相同有效的(选择关系). (3)  $b_1 \parallel b_2 \parallel \dots \parallel b_n$ , 行为是并行的. ETS 上动作的集合  $A = \{ a_i | a_i \in A \}$ ,  $a_i = def b_j \in B | a_i[] a_j \gg a_i | a_i \parallel a_j | a_i \}$ , 操作符优先顺序是: ‘ $()$ ’ > ‘ $[]$ ’ > ‘ $\gg$ ’ > ‘ $\parallel$ ’.

**定义 9** 变迁关系  $r \in R$  是一个五元组  $\langle a, s, s', p, f \rangle$ , 其中:  $a$  是一个使能的动作.  $s, s' \in S$  是 ETS 的状态(不需要明确区分).  $p \in T_{\Sigma}(V)$   $I$  是一个与  $r$  相关的使能谓词.  $f \in T_{\Sigma}(V)$  是一个与  $r$  相关的动作函数. 如果 ETS 处于状态  $s$ , 发生动作  $a$ , 则根据变量当前值对谓词进行评价. 如果  $p$  为真, ETS 将进入新状态  $s'$ , 变量被动作函数  $f$  更新.

**定义 10** 让  $s, s' \in S$ ,  $a_1, a_2, \dots, a_n \in A$ ,  $\mu \in A^*$  表示一串动作

$a_1, a_2, \dots, a_n$ . 每个可观察的动作  $a$  包含输入/输出原语和零个或多个参数. 我们用关系  $\xrightarrow{\mu}$  表示:  $\text{iff } \exists s_0, s_1, \dots, s_n \in S$ ,  $s = s_0 \xrightarrow{a_1} s_1 \xrightarrow{a_2} \dots \xrightarrow{a_n} s_n = s'$ . 考虑内部动作, 定义可观察序列关系. 让  $i^k$  表示内部动作  $i$  ( $k \geq 0$ ) 的序列,  $\mu$  表示一串动作  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , 当  $\exists \sigma = i^k, a_1, i^k, a_2, i^k, \dots, a_n, i^k, s \xrightarrow{\sigma} s'$  时,  $s \xrightarrow{\mu} s'$ . 进一步定义表述法:

$$s \xrightarrow{e} s' \text{ iff } s \xrightarrow{i^k} s'.$$

$$s \xrightarrow{\mu} s' \text{ iff } \exists s', s'' \xrightarrow{\mu} s'.$$

$$s \xrightarrow{\mu} s' \text{ iff } \neg \exists s', s'' \xrightarrow{\mu} s'.$$

$$\text{Trace}(ETS) \Rightarrow \{ \mu \in A^* | s_0 \xrightarrow{\mu} s \}.$$

$$\text{ETS after } \mu = \{ s \in S | \exists \mu \in A^* | s_0 \xrightarrow{\mu} s \}.$$

$$\text{ETS after } \mu \text{ refuse } A' \text{ iff } \exists s \in \text{ETS after } \mu, \forall a \in A', A' \subseteq A, s \xrightarrow{\mu} s'.$$

基于 ETS 及其组合来模型一个分布式系统. (1) 对于原子实体, 每个交互点的行为  $b$  可被模型为一个 ETS, 门径数目为 1. (2) 原子实体是上述几个并发的变迁系统的组合(变迁系统的数目与交互点的数目一样). 每个交互点是一个门径; 动作是不同门径的并发行为. (3) 实体是几个组件(实体或原子实体)的组合. (4) 视点 is the ETS 的组合. 在分布式系统、视点和实体均用 ETS 模型后, 可得到:

实体一致性关系  $ecof_{ij}$ :

$$ie_{ij} \underline{ecof}_{ij} se_{ij} \text{ iff } \forall \mu \in \text{Trace}(se_{ij}), \forall A' \subseteq A,$$

$ie_{ij}$  after  $\mu$  refuse  $A' \Rightarrow se_{ij}$  after  $\mu$  refuse  $A'$ .

视点一致性关系  $uptconf_i$ :

$upt_i \text{upt} conf_i, spt_j$  iff  $\forall ie_{ij}, se_{ij}, ie_{ij} \in in \text{upt}_i, ie_{ij} \in in \text{spt}_j,$   
 $ie_{ij} \in out_j se_{ij}$ .

分布式系统一致性关系  $dsconf$ :

$i_{DS} dsconf s_{DS}$  iff  $\forall \text{upt}_i, \text{spt}_j, \text{upt}_i \text{upt} in i_{DS}, \text{spt}_j \text{spt} in s_{DS},$   
 $upt_i \text{upt} conf_i, spt_j$ .

测试例  $te_{ij}$  是一个 ETS, 那么测试执行是一系列轨迹:

$exece_{ij}(te_{ij}, ie_{ij}) = \{\mu \in A \mid te_{ij} \parallel ie_{ij} \text{ after } \mu \text{ deadlock}\}$

如  $\forall \square \mu \in exece_{ij}(te_{ij}, ie_{ij}), te_{ij} \text{ after } \mu \text{ deadlock}$ , 则测试决  
 verdict  $te_{ij}(exece_{ij}(te_{ij}, Ce_{ij}(ie_{ij}))) = \text{pass}$ ; 否则,  $vdicte_{ij}(exece_{ij}$   
 $(te_{ij}, Ce_{ij}(ie_{ij}))) = \text{fail}$ .

因此  $ie_{ij} \text{pass} Te_{ij}$  iff  $\mu te_{ij} \in Te_{ij}, vdicte_{ij}(exece_{ij}(te_{ij}, Ce_{ij}$   
 $(ie_{ij}))) = \text{pass}$ .

$upt_i \text{pass} TVPT_j$  iff  $\forall ie_{ij}, ie_{ij} \in in \text{upt}_i, ie_{ij} \text{pass} Te_{ij}$

$i_{DS} \text{pass} IDS$  iff  $\forall \text{upt}_i, \text{spt}_j \text{upt} in i_{DS}, ie_{ij} \text{pass} Te_{ij}$ .

#### 4 结束语

本文的目的是用形式化技术清晰地讨论分布式系统测试的概念和方法, 以指导具体的测试技术. 基于 ETS 设计了形式描述模型和测试生成方法, 实现了一个基于 TTCN 的集成测试系统 PITS, 并应用本文中的概念和方法对分布式的路由协议进行了测试. 作者计划在后续研究中针对不同的分布式系统进行更多实际测试以检验和改进本文的测试方法和测试系统.

#### 参考文献

- [ 1 ] ISO/IEC JTC1/SC21 WG7, ITU-T SG 10/Q. 8. Proposed ITU-T Z. 500 and committee draft on "formal methods in conformance testing". 1996
- [ 2 ] ISO. Information Processing System-Open System Interconnection-OSI conformance testing methodology and framework. ISO/IEC 9646, 1993



毕 军 27 岁, 博士, 清华大学计算机系讲师. 作为主要完成人先后参加多项国家自然科学基金, 国家“八五”、“九五”科技攻关和“863”项目. 主要从事高速计算机网, 形式化方法, 网络路由协议方面的研究工作.

吴建平 44 岁, 博士, 清华大学计算机系教授, 中国教育和科研计算机网专家委员会主任. 作为项目负责人先后参加多项国家自然科学基金, 国家“七五”、“八五”、“九五”科技攻关和“863”项目. 长期从事高速计算机网, 网络协议工程学, 网络管理, 网络安全等方面的研究工作.

朱 江 23 岁, 清华大学计算机系硕士研究生, 从事协议测试和网络路由协议方面的研究工作.