

基于 AOP 的时空 Petri 网的 CPS 建模

宋振华¹ 张广泉^{1,2}

(苏州大学计算机科学与技术学院 苏州 215006)¹

(中国科学院计算机科学国家重点实验室 北京 100190)²

摘要 信息-物理融合系统(Cyber-Physical System, CPS)作为一系列物理过程和计算过程的紧密集成,体现为物理世界和信息世界的交互与融合。针对 CPS 的时空及非功能属性,提出一种面向方面的时空 Petri 网建模方法,在保证时空一致性的前提下,分离系统中的核心关注点和横切关注点,将横切关注点单独作为方面进行分析,并将构建规则方面重新织入系统。该方法在系统设计阶段可以对不同的非功能属性进行形式化分析,提高了系统的可靠性和可维护性。最后通过实例说明了该方法的可行性。

关键词 面向方面,建模,CPS,Petri 网

中图分类号 TP301 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.007

Modeling of CPS Based on Aspect-oriented Spatial-Temporal Petri Net

SONG Zhen-hua¹ ZHANG Guang-quan^{1,2}

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)¹

(State Key Laboratory of Computer Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)²

Abstract As a tight integration of computing and physical processes, cyber-physical system (CPS) is the integration of cyber and physical worlds. According to the spatial-temporal and non-function properties in CPS, this paper presented a modeling approach based on aspect-oriented spatial-temporal Petri net. It separates core concern and crosscutting concerns from the system, and allows for analyzing crosscutting cores as aspect modules while ensuring the consistency of time and space. By building rules, these aspect modules will be woven into the system again. This approach can improve the reliability and maintainability for formal analysis of different non-function properties at the system design phase. At last, it is showed that the modeling approach is feasible through an example.

Keywords Aspect-oriented, Modeling, CPS, Petri net

1 引言

信息-物理融合系统^[1]作为一系列物理过程和计算过程的紧密集成,体现为计算、通信和控制的深度融合。它通过计算组件对物理实体(传感器、执行器和控制器)进行计算,基于反馈循环实现对物理环境的动态感知和实时控制。目前, CPS 已被广泛应用于智能医疗、航空航天、智能交通、智能机器人和工厂控制等安全领域。因此,对相关系统进行建模分析从而保障系统安全运营具有重要的理论和实际意义。

在 CPS 的形式化建模方面,国内外研究者已进行了一些相关研究,目前主要有基于 Actor、混成自动机、微分动态逻辑和 Petri 网的建模方法。

Petri 网作为一种图形和数学化建模工具,能提供清楚和精确的形式化语义以及直观的图形表示,并广泛应用于描述和分析并发、异步和分布式系统方面^[2]。由于 CPS 系统行为的响应不仅与经历的时间有关,同时与所处空间有关,因此需

要对基本 Petri 网进行扩展,以使其满足对物理实体的时空属性描述。文献[3]提出了一种 CPS 物理实体的形式化建模方法。它在时间 Petri 网的基础上引入空间因素,构造时空 Petri 网模型,使其不仅能够描述物理实体逻辑及时间层次的行为,而且能够描述物理实体变迁所引起的状态变化。

但文献[3]并未考虑 CPS 的非功能属性描述。CPS 作为安全关键应用,对其实时性、安全性和可靠性的要求比传统的计算系统更高,因此设计能有效支持非功能属性分析的模型应着重考虑。面向方面程序设计^[4]作为一种关注点分离的新技术,将横切关注点(通常是系统的非功能属性)模块化为方面单独设计。

基于面向方面的 Petri 网最早由 Roubtsova 和 Askit 于 2005 年提出,它采用基本 Petri 网重新定义并构建了基本网、方面网和编织规则三元素^[5]。文献[6]针对谓词/变迁网,借用 ASPECTJ 思想,对系统进行安全检测与验证。文献[7]根据 CPS 的特点,定义了一种面向方面的连续 Petri 网。在建

到稿日期:2016-08-20 返修日期:2016-10-25

宋振华(1991—),男,硕士,主要研究方向为信息物理融合系统的建模与分析, E-mail: 20144227030@stu.suda.edu.cn; 张广泉(1965—),男,博士,教授,硕士生导师, CCF 高级会员,主要研究方向为网络软件工程、形式化方法、云计算、物联网(CPS)等。

模过程中,它将CPS中普遍存在的物理连续过程作为一个方面,织入到基本离散Petri网中。

文献[5-7]在给出面向方面的定义时,对不同类型的关注点缺少完整的方面编织规则。同时需要重新定义面向方面的一系列元素,使其适应对CPS进行描述。

本文在时空Petri网的基础上,加入面向方面的编织方法对CPS建模。该方法在一定程度上简化了CPS系统,同时避免了组件之间不必要的混乱和零散,从而提高系统的可靠性。

2 基于时空Petri网的CPS建模

2.1 CPS模型定义

CPS系统通过网络将物理实体进行连接,形成以物理实体为节点的网络化系统^[8]。物理实体大体分为3类:传感器、控制器和执行器。传感器主要采集外界环境信息,通过网络将信息传输给控制器;控制器接收来自传感器的信息,对其进行计算和分析,从而产生控制信号和指令,并发送给对应执行器;执行器根据控制信号和指令单独进行分析,执行相应的任务。

定义1 CPS总体模型定义为 $CPSM = \{Sensors, Actuators, Controllers, Interfaces\}$ 。其中 $Sensors = \{Sensor1, Sensor2, \dots\}$ 表示传感器节点的集合; $Actuators = \{Actuator1, Actuator2, \dots\}$ 表示执行器节点的集合; $Controllers = \{Controller1, Controller2, \dots\}$ 表示控制器节点的集合; $Interfaces = \{Interface1, Interface2, \dots\}$ 表示接口集合,是各物理实体节点之间的接口。

定义2 CPS中各物理实体节点定义为 $Sensors = \{Sid, Sstate, Sfun, Sin, Sout, Ins\}$, $Actuators = \{Aid, Astate, Afun, Ain, Aout, Ins\}$, $Controllers = \{Cid, Cstate, Cfun, Cin, Cout, Ins\}$ 。其中 id 表示各物理实体类标识, $state$ 表示物理实体所处的状态, fun 表示各物理实体的有限功能集合; in 和 out 表示各物理实体之间的指令输入、输出接口; Ins 表示各物理实体传输和接收的指令。

2.2 时空Petri网定义

基本Petri网中库所令牌属于同一类型,个体间往往没有区别。如果采用基本Petri网对CPS建模,很容易造成状态空间爆炸问题。着色Petri网^[9]在继承基本Petri网的结构和动态性质的基础上,增加了颜色集的概念,将具有相同性质的同类个体染上相同颜色,对不同类型个体则以不同颜色进行区分。

针对CPS的时空属性,本文对时空Petri网^[3]扩展,加入颜色集,以不同颜色对物理实体和物理实体的属性进行区分。与原时空Petri网不同,为了满足物理实体的空间属性,这里采用颜色令牌表示CPS物理实体在空间上的位置,并通过改变令牌颜色来实现物理实体空间位置上的变化。

定义3 时空Petri网 $STPN = (\Sigma, P, T, F, C, WI, WO, Ins, F_I, D)$ 。

Σ 是一类非空类型,称为颜色集合。

$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 作为库所的非空有限集合,以空心圆表示。

$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ 作为变迁的非空有限集合,以空心矩形表示。

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 。并且 $P \cap T = P \cap F = T \cap F = \emptyset$ 。

对于 $\forall t \in T, t = \{p \in P | (p, t) \in F\}, t' = \{p \in P | (t, p) \in F\}$, t 和 t' 分别称为变迁 t 的输入库所和输出库所。

C 为颜色函数,是 P 到 Σ 上的映射。 $\forall p \in P, C(p)$ 是库所 p 上可能出现的所有颜色令牌的集合。

$WI(p, t)$ 为库所 p 到变迁 t 的输入权函数: $P \times T \rightarrow (C \times N_0)$, 对应着从 p 到 t 的有向弧,表示变迁发生时从输入库所中移除的颜色令牌及对应的个数。

$WO(t, p)$ 为变迁 t 到库所 p 的输出权函数: $T \times P \rightarrow (C \times N_0)$, 对应着从 t 到 p 的有向弧,表示变迁发生时输出库所产生颜色令牌及对应的个数。

Ins 表示将物理实体之间传递的指令以颜色令牌的形式表示,包含物理实体的一系列属性和功能。例如采用颜色表示CPS物理实体的空间位置。

$F_I \subset P \times T$ 称为抑制弧集合。

$D(t) = [\alpha(t), \beta(t)]$ 表示每个变迁发生所持续的时间区间,即对于变迁 $t \in T$,需要 $d(t)$ 时间才能完成,其中, $\alpha(t) \leq d(t) \leq \beta(t)$ 。

定义4 时空Petri网的可达标识形式化表示为 $M = (MP_1, MP_2, \dots, MP_{|P|})$, 其中 $MP_i = ((c_1, n_1), (c_2, n_2), \dots, (c_k, n_k) | c \in C, n \in N_0)$ 表示库所 P_i 中令牌的颜色种类和对应数量。

定义5 (时空Petri网的使能规则) 变迁 t_i 使能,当且仅当 $\forall p_i \in t_i: MP_i \geq WI(p_i, t_i)$ 。

定义6 (时空Petri网的激发规则) 使能的变迁 t_i 激发后,将从标识 M 到达新的标识 $M' = (MP_1', MP_2', \dots, MP_{|P|}')$, 其中 $MP_i' = MP_i - WI(p_i, t_i) + WO(t_i, p_i)$ 。

抑制弧^[10]又称抑止弧,在Petri网中,抑制弧通过在库所和变迁之间添加一条空心圆结尾的弧以区别普通弧。只有库所中的令牌为空时,与抑制弧相连的变迁才能触发。抑制弧的引入使Petri网具备零校验功能。

定义7 时空Petri网中抑制弧的定义如下:

1) $F_I \subset P \times T$ 作为抑制弧集合,满足 $F_I \cap F = \emptyset$ 。

2) 对于 $\forall p \in P$, 有 $(p, t) \in F_I \rightarrow |M(p)| = 0$, 则 t 在标识 M 下有发生权,记为 $M[t)$ 。

3 面向方面方法

面向方面程序设计 (Aspect-Oriented Programming, AOP) 作为面向对象技术的补充和完善,是一种基于关注点分离的技术。其核心思想是将分散的关注点从系统中分离,封装到一个可重用模块(即方面)中进行设计和实现。基于横切技术, AOP 中的关注点分离为两个部分:核心关注点和横切关注点。业务处理的主要流程是核心关注点,分散于各个业务子系统的公共需求则是横切关注点,例如权限验证、日志和安全性等。面向方面建模则是将面向方面的思想应用于形式化描述中,各项需求被分离以作为方面独立规约,因而在分析每个方面时可以不受其他方面的影响。

如图1所示,整个面向方面的实现过程主要分为3个阶段:方面分解、方面实现和方面编织。

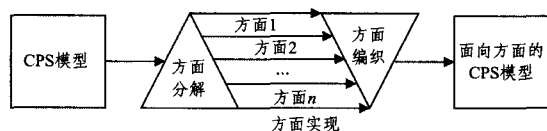


图1 面向方面方法的实现过程

首先需要对 CPS 进行系统分析,分离核心关注点和横切关注点。其中,核心关注点主要指物理实体活动,而横切关注点则是横跨系统的一系列非功能属性,例如将系统可靠性作为一个方面。

接下来构建面向方面的时空 Petri 网。

定义 8 $AOSTPN = (BN, AN)$ 。其中, BN 为基本网,表现为核心关注点,这里即为时空 Petri 网。 $AN = \{AN_1, AN_2, \dots, AN_n\}$ 为方面网,表现为横切关注点,以基本 Petri 网表示。

定义 9 方面网定义为 $AN_i = \{Jp, Pc, Ad, Intro\}$, $PC = \{tcut, pcut, acut\}$, $Ad = \{before, after, around\}$, $Intro = \{P, P_m, P_{out}, T, F\}$ 。其中:

1) Jp (连接点): $Jp \subset BN$, 即基本网中已定义的元素,表示为 $BN.x$, 它可以是 Petri 网中的库所、变迁或者弧。

2) Pc (切入点): 是基于定义的规则,从所有的连接点中过滤出的特定连接点子集。这里将库所切入点记为 $pcut$, 变迁切入点记为 $tcut$, 弧切入点记为 $acut$ 。

3) Ad (建议): 满足切入点描述的连接点上触发执行的操作,即将方面网编织到基本网中的不同操作方式。 Ad 包括 *before*, *after* 和 *around* 3 种类型。

① *before*: BN 中令牌到达连接点位置但计算还没开始时,执行 AN 上的计算。

② *after*: BN 中令牌到达连接点位置时会先执行 BN 连接点上的计算,然后才执行 AN 上的内容。

③ *around*: 当令牌到达连接点位置时,采用抑制弧来决定继续执行连接点上的计算还是代替该点执行 AN 上的计算,即抑制弧所连接的库所中如果包含令牌,连接点上的计算不会被执行。

4) $Intro$ (引入): 描述了一个基于 Petri 网的模块,它根据建议织入 BN 中。其中, P_m 和 P_{out} 分别是引入的输入接口和输出接口。

最后,以变迁切入点为例,根据建议类型构建编织规则,将方面网重新织入基本网以构成新网。

方面网的编织规则步骤如下:

(1) 将引入和建议组合构成新方面网 $AN1$, 在引入中删除与建议重复的元素以及所有与之相关联的弧,最后删除引入中的 P_m 和 P_{out} 以及与之相关联的弧。

(2) 按建议类型将 $AN1$ 编织到 BN 中,构造新网 $BN1$ 。

1) 建议类型为 *before*: 对每个 BN 中符合 $AN1$ 切入点 $tcut$ 定义的变迁 t 及 $tcut$ 的任意前驱 $tcut$, 添加一条 $tcut$ 到 t 的有向弧。删除 $tcut$ 及所有与之相关联的弧。

2) 建议类型为 *after*: 对每个 BN 中符合 $AN1$ 切入点 $tcut$ 定义的变迁 t 及 $tcut$ 的任意后继 $tcut'$, 添加一条 t 到

$tcut'$ 的有向弧。删除 $tcut$ 及所有与之相关联的弧。

3) 建议类型为 *around*: 对每个 BN 中符合切入点 $tcut$ 定义的变迁 t 的前驱 t' 及建议中指定的 $tcut$ 后继 ($tcut'$), 添加一条 t' 到 ($tcut'$) 上的有向弧;同时对每个 BN 中符合切入点 $tcut$ 定义的变迁 t 的后继 t' 及建议中指定的 $tcut'$ 前驱 ($tcut'$), 添加一条 ($tcut'$) 到 t' 上的有向弧。删除 $tcut$ 和 $tcut'$ 及所有与之关联的弧。并从 $AN1$ 中指定抑制库所,选择 BN 上对应的变迁,添加抑制弧。

图 2—图 5 是对上述编织规则的应用举例,其中图 2 为基本网 BN ,图 3 为方面网 AN ,可以看到 AN 将基本网中的 $t3$ 作为切入点,并要求以 *around* 建议编织。

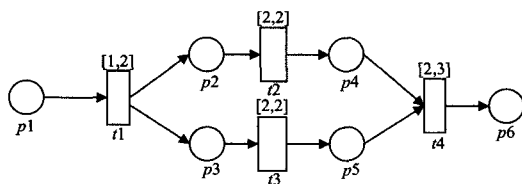


图2 基本网 BN

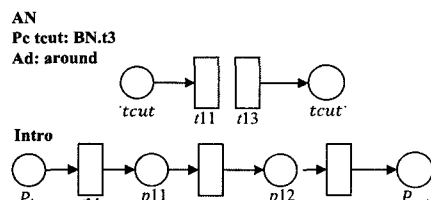


图3 方面网 AN

按照编织规则,需要将 Ad 和 $Intro$ 进行组合构成新方面网 $AN1$ 。图 3 中 Ad 和 $Intro$ 都存在相同的 $t11$ 和 $t13$ 。选择 Ad 中的 $t11$, 添加一条有向弧到 $p11$ (即 $Intro$ 中 $t11$ 的后继);同理,选择 Ad 中的 $t13$, 从 $p12$ (即 $Intro$ 引入中 $t13$ 的前驱) 添加一条有向弧到 $t13$ 。最后删除 $Intro$ 中的 $t11, t13, P_m$ 和 P_{out} 以及所有与之相关联的弧,构成新方面网 $AN1$ 。结果如图 4 所示。

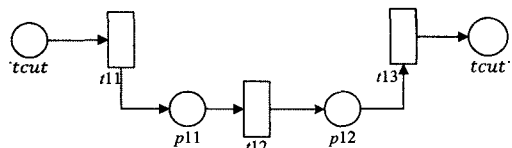


图4 Intro 和 Ad 组合构成新方面网 AN1

最后按照 *around* 建议类型,将 $AN1$ 编织到 BN 中,构成新网 $BN1$,如图 5 所示。

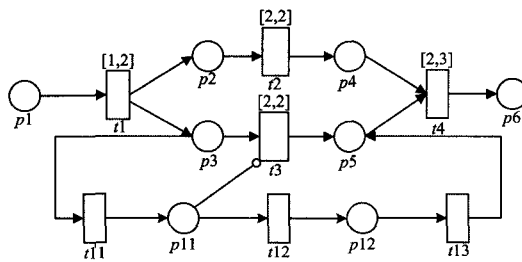


图5 采用 around 建议构成新网 BN1

4 实例分析

本文以智能机器人为例。在机器人的活动范围内部署大量的传感器来记录机器人的移动位置。对每个机器人分配一个到固定地点捡垃圾并进行清理的任务,要求其在固定的时间内完成。一旦任务完成,则在原地等待新的任务分配。

分析:将机器人捡垃圾的物理过程作为系统的核心关注点,以时空 Petri 网描述。而横切关注点则为机器人故障检测和修复,以方面网描述。考虑以下两类故障。

- (1)错误数据:产生和收集的数据出现错误。这类错误类型主要分为两个子类:1)周围环境因素(例如噪音)导致采集的数据不精确。2)数据已经超出正常值的范围,导致采集的数据无效。对于这类故障,需要将错误数据与标准数据进行对比并调校。
- (2)重复的操作故障:对于控制器发送的多次指令,传感器和执行器只是返回错误值,并不依据指令执行任务。对于此类故障,需要将设备重置恢复到之前保存的正常状态。
- 接下来以物理实体建模、基本网建模和方面网构建及编织 3 个步骤对该例说明。

(1)物理实体建模

由于本文的核心关注点是机器人捡垃圾这个物理过程,限于篇幅,对传感器和控制器不再详细建模。

对执行器即机器人进行定义: $Robot = \{Rid, Rstate, Rin, Rout, Rloc, Rtime, Ins\}$ 。其中 Rid 为机器人实体类标识, $Rstate = \{work, ready, stop, move, fault\}$ 分别为机器人工作、就绪、停止、移动和故障 5 种状态。 $Rloc = (x, y, dir)$ 表示机器人当前所处的坐标位置及行进方向。 $Rtime = [\alpha(t), \beta(t)]$ 表示机器人完成相应操作所消耗的时间区间。指令 $Ins = \{Insid, Ins_state, Ins_loc\}$, 其中 $Insid$ 表示指令标识符, Ins_state 表示机器人接受指令改变为何种状态, Ins_loc 表示机器人接受指令要达到的目标位置及行进方向。

(2)基本网建模

图 6 将机器人捡垃圾作为基本网进行建模,并用表 1 对图中的库所和变迁进行说明。图中控制器通过机器人接口 1 对机器人发送了一个 $(1, move, (4, 10, null))$ 指令,即分配编号 1 的机器人移动到 $(4, 10)$ 执行捡垃圾任务。然后,机器人计算最佳路线并进行移动。如果当前位置判别为目标位置,则停止移动并执行捡垃圾任务;如果不是,则机器人计算路线并继续进行移动。在机器人行进过程中,同时需要考虑障碍物的存在。如果传感器在当前位置发现障碍物,采取的措施是机器人在当前位置停止移动,进行转向以避开该障碍物。

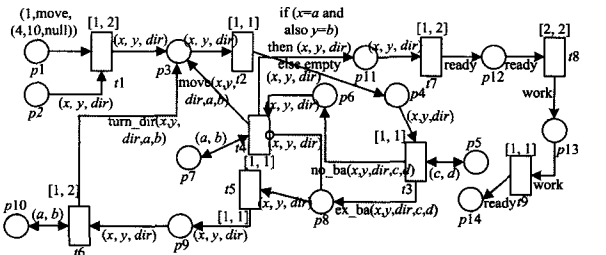


图 6 机器人捡垃圾基本网 BN

表 1 机器人垃圾库所和变迁说明

节点	节点含义
p1	机器人接口 1(接收控制器发布的任务指令)
p2	机器人接口 2(获取机器人初始位置信息)
p3	机器人 ready 状态
p4	获取机器人当前位置信息
p5	机器人接口 3(用于获取周围的障碍物信息)
p6	机器人前进方向上不存在障碍物
p7	机器人接口 4(传感器获取目的地位置信息)
p8	机器人前进方向上存在障碍物
p9	机器人 stop 状态
p10	机器人接口 5(传感器获取目的地位置信息)
p11	机器人到达目标位置
p12	机器人 ready 状态
p13	机器人 work 状态
p14	机器人 ready 状态
t1	接收指令信息并处理
t2	处理机器人位置信息
t3	判断当前位置是否存在障碍物
t4	机器人进行移动
t5	机器人停止移动
t6	机器人进行转向避开障碍物
t7	机器人停止移动
t8	机器人开始工作
t9	机器人完成任务

(3)方面网建模及编织

将机器人故障检测和修复作为方面进行建模。该方面网主要分为以下几个步骤。首先,在机器人执行任务前检测机器人状态,如果出现故障,则停止机器人活动。然后,分析故障原因,如果是机器人参数出现问题,则需要与标准参数进行对比,并进行校正;如果是其他问题,例如机器人对接受的指令不做任何处理,则需要对机器人重置,恢复为之前保存的状态,并重新检测机器人是否还处于故障状态。如果机器人没有出现故障,则对机器人运行时数据进行收集和调校,并对当前信息进行保存。将上述方面网采用 *around* 建议织入基本网,构建为新网 BN1,如图 7 所示,其中虚线框中为方面网 AN。

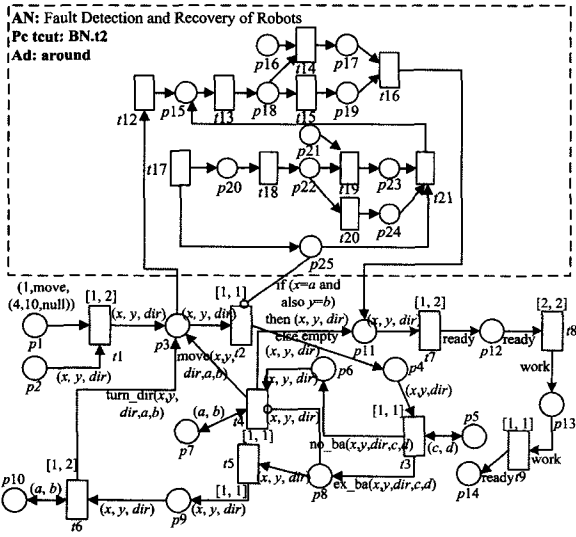


图 7 采用 around 建议类型构成新网 BN1

Route:Lightweight Not-Via without Additional Addresses[C]// INFOCOM, 2009;157-168.

[13] GUMMADI, KRISHNA P, et al. Improving the reliability of internet paths with one-hop source routing[C]// Conference on Symposium on Opearting Systems Design & Implementation USENIX Association, 2004;13-13.

[14] FORTZ B, THORUP M. Optimizing OSPF/IS-IS Weights in a Changing World [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 20(4); 756-767.

[15] ATLAS A, ZININ A. Basic specification for ip fast reroute: Loop-free alternates[C]//RFC 5286. 2008;1-32.

[16] YANG X, WETHERALL D. Source selectable path diversity via routing deflections[C]//SIGCOMM. 2006;159-170.

[17] ATLAS A. U-turn A lternates for Ip/LDp Fast-Reroute[C]// IETF Internet Draft. 2006;1-29.

[18] SRIDHARAN A, GUERIN R, DIOT C. Achieving near-optimal traffic engineering solutions for current ospf/is-is networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2005, 13(2): 234-247.

[19] FRANCOIS P, BONAVENTURE O. An evaluation of ip-based fast reroute techniques[C]//CoNEXT. 2005;244-245.

[20] RETVÁRI G, CSIKOR L, TAPOLCAI J, et al. Optimizing igp link costs for improving ip-level resilience[C]//Design of Reliable Communication Networks (DRCN). 2011;62-69.

[21] MARKOPOULOU A, IANNACCONO G, BHATTACHARYYA S, et al. Characterization of Failures in an Operational IP Backbone Network [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2008, 16(4); 749-762.

[22] NETWORK A B. Advanced networking for research and education[OL]. <http://abilene.internet2.edu>, 2003.

[23] SPRING N, MAHAJAN R, WETHERALL D, et al. Measuring isp topologies with rocketfuel [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(1): 2-16.

[24] MEDINA A, LAKHINA A, MATTA I, et al. Brite: An approach to universal topology generation [C] // IEEE International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. 2001;346-353.

[25] GJOKA M, RAM V, YANG X. Evaluation of ip fast reroute proposals[C]// Communication Systems Software and Middleware. 2007;1-8.

(上接第 41 页)

表 2 机器故障检测和修复库所和变迁说明

节点	节点含义
p15	显示机器人状态
p16	传感器输入接口
p17	传感器输出接口
p18	机器人输入接口
p19	机器人输出接口
p20	故障输入接口
p21	标准参数输入接口
p22	显示故障原因
p23	机器人当前状态
p24	机器人重置后状态
p25	机器人 fault 状态
t12	检查机器人状态
t13	保存当前状态信息
t14	收集数据
t15	调校数据
t16	保存当前状态信息
t17	接收故障信息
t18	分析故障原因
t19	参数校正
t20	对机器人进行重置
t21	检查机器人状态

结束语 CPS 作为时空多维的安全关键系统,如何对其时空属性和非功能属性进行建模成为一大挑战。本文提出了一种面向方面的时空 Petri 网建模方法,该方法在一定程度上降低了系统的耦合性,提高了可扩展性和可维护性。以后工作将会对系统中的方面网进行形式化分析,并采用模型检测工具对系统关键属性进行分析和验证。

参 考 文 献

[1] HE J F. Cyber-Physical Systems[J]. China Computer Federation, 2010, 6(1); 25-29. (in Chinese)

何积丰. Cyber-Physical Systems[J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 6(1); 25-29.

[2] GIRAULT C, VALK R. Petri Nets for Systems Engineering: A Guide to Modeling, Verification, and Applications [M]. Springer& Business Media, 2013.

[3] ZHANG M T, ZHANG G Q, ZHANG K, et al. Spatio-Temporal Petri Net Model for Describing CPS Physical Entities[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2013, 7(4); 377-384. (in Chinese)

张茗泰, 张广泉, 张侃, 等. 描述 CPS 物理实体的时空 Petri 网模型[J]. 计算机科学与探索, 2013, 7(4); 377-384.

[4] KICZALES G, LAMPING J, MENDHEKAR A, et al. Aspect-oriented programming[C]// European Conference on Object-oriented Programming. Springer Berlin Heidelberg, 1997; 220-242.

[5] ROUBTSOVA E, AKSIT M. Extension of Petri Nets by Aspects to Apply the Model Driven Architecture Approach [C]// Preliminary Proceedings of the 1st International workshop on Aspect-Based and Model-Based Separation of Concerns in Software Systems (ABMB). 2005;1-15.

[6] XU D, NYGARD K E. Threat-Driven Modeling and Verification of Secure Software using Aspect-Oriented Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2006, 32(4); 265-278.

[7] QIAN Z, YU H. A TAOPN Approach to Modeling and Scheduling Cyber-Physical Systems[C]// International Conference on Information Science and Applications (ICISA). IEEE, 2013; 1-7.

[8] ZHENG L, RONG M, Zhang G, et al. Method for Modeling CPS Based on Open Colored Petri Net [J]. Journal of Computational Information Systems, 2014, 10(22); 9657-9664.

[9] JENSEN K. An Introduction to the Theoretical Aspects of Coloured Petri Nets [M]// A Decade of Concurrency Reflections and Perspectives. Springer Berlin Heidelberg, 1994; 230-272.

[10] CHRISTENSEN S, HANSEN N D. Coloured Petri Nets Extended with Place Capacities, Test Arcs and Inhibitor Arcs[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1993.