

基于 ROAD-CPN 业务架构的可执行建模方法

黄凤兰, 倪 枫, 刘 姜, 张敬鸿, 拓开慧

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 开放组架构框架(TOGAF)业务架构作为数据架构、应用架构和技术架构的基准, 在企业系统架构设计中占据引导作用。但由于其自身描述形式的局限性, 存在无法对系统业务架构框架动态特征进行分析的问题, 故提出一种基于 ROAD 业务架构的着色 petri 网(CPN)可执行模型生成方法。该方法基于 TOGAF 业务架构 ACF 元模型划分提出的 4 类模型——规则模型(RM)、组织模型(OM)、活动模型(AM)和数据模型(DM), 建立 4 类模型不同描述形式与 CPN 建模语言间的对应关系, 进而提出以 RM, OM, AM 和 DM 为主体的可执行模型五阶段建模方法。最后, 以幼儿园智能晨检机器人系统业务架构为例, 验证了所提方法的可行性和有效性。该方法实现了灵活、自动化的 CPN 可执行模型的生成, 打破了业务架构建模语言和 CPN 建模语言之间的限制。

关键词: 系统架构; 着色 petri 网; 开放组织架构框架; 业务流程; 可执行模型

中图分类号: N 94

文献标志码: A

Executable modeling method based on the ROAD-CPN business architecture

HUANG Fenglan, NI Feng, LIU Jiang, ZHANG Jinghong, TUO Kaihui

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The Open Group Architecture Framework (TOGAF) business architecture is a benchmark for data architecture, application architecture and technical architecture, and occupies a guiding role in the design of enterprise system architecture. However, due to the limitation of its description form, the dynamic characteristics of the business architecture cannot be analyzed. A colored petri net (CPN) executable model generation method based on ROAD business architecture was proposed. The method was based on the four types of models proposed by the division of the ACF metamodel of TOGAF business architecture—rule model (RM), organization model (OM), activity model (AM) and data model (DM). The corresponding relations between the different description forms of the four types of models and the CPN modeling language was established. The five-stage modeling method of executable models with RM, OM, AM and DM as the main body was then proposed. Finally, the feasibility of the method was verified by taking the business architecture of the kindergarten intelligent morning

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12371508); 教育部产学研合作协同育人项目(220603760210846); 上海市“大学生创新创业训练计划”资助项目(SH2022072)

第一作者: 黄凤兰(1998-), 女, 硕士研究生。研究方向: 系统科学、系统分析与集成。E-mail: huangfenglan2022@163.com

通信作者: 倪 枫(1982-), 男, 副教授。研究方向: 系统科学、系统分析与集成。E-mail: nifeng@usst.edu.cn

inspection robot system as an example. It achieves creation of CPN executable model and breaks the limitations of modeling languages of business architecture and CPN model.

Keywords: *system architecture; colored Petri net; the open group architecture framework; business process; executable model*

开放组织架构框架 (TOGAF)^[1] 由国际标准权威组织 The Open Group 制定, 是一个体系结构框架。TOGAF 能够为组织设计、评估和构建正确的体系结构, 并已成为被广泛采用的成熟的企业架构框架^[2]。它对架构开发过程和架构内容分别给出两套通用的参考标准^[3]: 一个可靠的卓有成效的架构开发方法 (architecture development method, ADM)^[4] 和一套元模型架构内容方法 (architecture content framework, ACF)^[5]。其中, ACF 元模型是在 TOGAF 架构建模过程中起到基石作用并在业务架构与信息系统架构的协同中起到纽带作用的企业架构模型的关键。TOGAF 为业务架构阶段提供了 9 个建议步骤和 18 个备选交付物^[1], 但是, 由于在实际运用中缺少成熟方法、工具和案例的支撑, 这些交付物的开发不能充分结合现有成熟的开发模型和方法, 难以确保可行性^[4]。

为了解决这一问题, 文献 [6] 通过对 TOGAF 业务架构 ACF 元模型的研究, 提出了一组基于元模型描述模型组合划分的 ROAD 元架构模型——规则模型 (RM)、组织模型 (OM)、活动模型 (AM) 和数据模型 (DM), 其中, RM 用 IF-THEN-ELSE 和 CASE 等规则逻辑控制语句来描述; OM 用 UML 协作图来描述; AM 用 IDEF0 图来描述; DM 用 IDEF1x 实体关系图来描述。然而, 这并不能达到企业对系统业务架构结构设计的性能进行评估的要求。从本质上讲, 系统是动态的, 组件系统之间的相互作用是根据相应事件发生而触发, 进一步带动相应系统功能的执行。但以上模型只是对系统动态行为进行静态描述。

Petri 网是由物理学家 Petri 提出的一种图形化和数字化建模工具^[7-8], 它可以对并发、异步、分布式、并行、非正确性和随机的信息处理系统进行建模^[9]。为了进一步提高 Petri 网的建模效率, 高级 Petri 网模型顺势被提出, 包括随机 Petri 网 (stochastic Petri net, SPN)^[10]、时间 Petri 网 (timed Petri net, TPN)^[11-12]、模糊 Petri 网 (fuzzy Petri net, FPN)^[13] 以及着色 Petri 网 (colored Petri net, CPN)^[14]

等。Petri 网可执行模型^[15] 是对体系结构动态行为验证和评估的重要手段之一。目前, 已经吸引了不少学者对基于 petri 网的可执行建模方法进行研究, 如文献 [16] 将 IDEF0 模型转换为 CPN 可执行模型, 文献 [17] 研究了从 IDEF0 模型到 CPN 模型的自动转换, 文献 [18-19] 将统一建模语言 (unified modeling language, UML) 模型转换为 CPN 可执行模型, 文献 [20] 将 UML 模型转换为 TPN 可执行模型, 文献 [21] 将 IDEF1x 模型转换为 CPN 可执行模型。但是, 这些方法仅对单一体系结构建模语言到 Petri 网建模语言进行映射, 缺乏灵活性和扩展性。

基于以上问题, 本文对文献 [6] 的工作进一步扩展, 将以不同建模语言间的语义对应关系为基础, 充分考虑 RM, OM, AM 和 DM 描述语言的不同表述特性以及 CPN 模型的结构和规则描述方式、颜色集定义方式, 进而建立 ROAD 业务架构体系结构的 CPN 可执行模型, 从而打破单一建模语言向 Petri 网模型转换的限制, 实现 ROAD 模型的动态仿真和评估。

CPN Tools^[22] 是一套 CPN 的编辑、仿真和分析工具, 对模型所生成的可达图^[23] 和状态空间报告进行分析, 可以检测可执行模型数据一致性和操作一致性, 如检测模型是否存在死循环、死锁、状态空间爆炸等问题^[24-26]。故本文将使用 CPN Tools 进行建模。

1 ROAD-CPN 建模方法

ROAD 元架构模型包括 RM, OM, AM, DM 这 4 个部分, 其中: RM 使用 IF-THEN-ELSE 和 CASE 等规则逻辑控制语句来描述; OM 使用 UML 协作图来描述; AM 使用 IDEF0 图来描述; DM 使用 IDEF1x 实体关系图来描述。CPN 模型则包括库所、变迁、颜色集、弧表达式函数、警卫函数等组成单元。所以, 创建从 ROAD 元架构 4 类模型到 CPN 模型的映射关系, 便是创建不同

建模语义之间的对应关系，如表 1 所示。

以不同建模语言间的语义对应关系为基础，充分考虑不同种语言的各自表述特点以及 CPN 模型的分层结构、规则表述、颜色集定义方式，可以将可执行模型建模过程划分为 5 个阶段。

表 1 ROAD 模型组成成分与 CPN 模型组成单元对应关系
Tab.1 Correspondence relations between ROAD model components and CPN model components

ROAD元 架构模型	模型描述方式	模型组成 成分	CPN模型 组成单元
RM	IF-THEN-ELSE, CASE等 规则逻辑控制语句	规则条件	输入弧函数、 警卫函数
		规则结果	输出弧函数
OM	UML协作图	对象	底层变迁
		连接	弧线
		消息	库所
AM	IDEF0 图	活动	变迁
		节点间输入 输出关系	弧线
		控制要素	
DM	IDEF1x实体关系图	机制要素	库所
		信息(或资源)	
		数据属性	单元颜色集
		数据实体	复合颜色集

第 1 阶段：调研系统需求。

依据 ROAD 元架构模型中的 OM 使用 UML 协作图表达，其中包括对象、连接、消息元素，首先明确系统设计建模的目的、模型边界、粒度要求，然后确定模型各个元素的底层关系。

第 2 阶段：确定模型结构。

依据 ROAD 元架构模型的 AM，以活动模型 IDEF0 图层次结构作为 CPN 模型分层结构的依据，构建 CPN 模型框架，并给出 IDEF0 模型与 CPN 模型的定义，再将活动模型 IDEF0 图中元素映射到 CPN 模型，如图 1 所示。

定义 1 $M_{IDEF0} = (In, Out, Con, M, Act, As)$

将基于 IDEF0 所描述的模型表示为一个六元组形式， In, Out, Con, M, Act, As 分别表示模型输入信息 (Input)；输出信息 (Output)；控制要素 (Control)；机制要素 (Mechanism)；活动 (Activity)；节点之间的关系弧 (Arrows)，包括输入弧 ($AsIn$)、输出弧 ($AsOut$)、控制弧 ($AsCon$)、机制弧 (AsM)，即 $As = (AsIn, AsOut, AsCon, AsM)$ ，且 $AsIn \cap AsOut = AsIn \cap AsCon = AsIn \cap AsM = AsOut \cap$

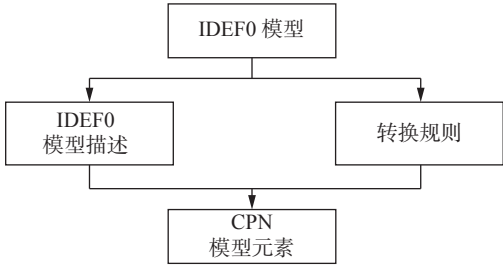


图 1 IDEF0 模型到 CPN 模型的映射

Fig. 1 Mapping from IDEF0 model to CPN model

$AsCon = AsCon \cap AsM = \emptyset$ 。

定义 2 $MCPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$

将基于 CPN 所描述的模型以一个九元组表示，其中， Σ ：表示颜色 (color) 的非空有限集合，称为颜色集 (color set)； P ：描述系统库所 (place) 的有限集合； T ：表示变迁 (transition) 的有限集合； A ：表示弧 (arc) 的有限集合，满足 $P \cap T = P \cap A = A \cap T = \emptyset$ ； N ： $A \rightarrow (P \times T \cup T \times P)$ 表示节点 (node) 有限集合函数； C ： $(P \cup T) \rightarrow \Sigma_{ss}$ ，表示着色函数 (color function)，其中， Σ_{ss} 是 Σ 的有限子集； G ： $T \rightarrow$ 表达式，表示 T 的警卫函数 (guard function)，且满足 $\forall t \in T : [Type(G(a)) = Bool \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$ ， $Bool = \{ture, false\}$ ； E ： $A \rightarrow$ 表达式，表示弧表达式函数 (arc expression function)，且满足 $\forall a \in A : [Type(E(a)) = C(p(a))ms \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$ ； I ：表示 $P \rightarrow$ 表达式的初始标识，且满足 $\forall p \in P : [Type(I(p)) = C(p)] = C(p)MS \wedge Var(I(p)) = \emptyset$ 。

设 φ 为 IDEF0 模型与 CPN 模型之间的映射，即 $\varphi: M_{IDEF0} \xrightarrow{\varphi} M_{CPN}$ 。该映射遵循如下规则：

$Act = \{act1, act2, \dots, actv\}$ ， $v \in \mathbb{R}$ ， $i \in (1, v) : acti \xrightarrow{\varphi} Ti$ ，即 IDEF0 模型中的任意活动均映射为 CPN 中的变迁；

$In = \{in1, in2, \dots, in\alpha\}$ ， $Out = \{out(1 + \alpha), out(2 + \alpha), \dots, out\beta\}$ ， $j \in (1, \alpha)$ ， $k \in (\alpha + 1, \beta) : inj \xrightarrow{\varphi} Pj, outk \xrightarrow{\varphi} Pk$ ，即 IDEF0 模型中的任意输入输出信息 (或资源) 均映射为 CPN 的库所；

$Con = \{con(\beta + 1), con(\beta + 2), \dots, con\theta\}$ ， $\theta \in \mathbb{R}$ ，且 $u \in (\beta + 1, \theta) : conu \xrightarrow{\varphi} Pu$ ，即对于 IDEF0 模型中的控制要素 C ，映射为 CPN 的库所；

$M = \{m(\theta + 1), m(\theta + 2), \dots, m\omega\}$ ， $\omega \in \mathbb{R}$ ，且 $r \in (\theta + 1, \omega) : mr \xrightarrow{\varphi} Pr$ ，即对于 IDEF0 模型中的机制要素 M ，它表示的是活动 A 所需要的资源，映射为 CPN 中的库所； $As = (AsIn, AsOut, AsM) = \{(asIn1, asIn2, \dots, asInh), (asOut(1 + h), asOut(2 + h), \dots, asOuti), (asCon(1 + i), asCon(2 + i), \dots, asConj), (asM(1 + j), asM(2 + j), \dots,$

$asMk\}\} \exists l \in (1, \hat{h}), n \in (\hat{h} + 1, \hat{i}), m \in (\hat{i} + 1, \hat{j}), x \in (j + 1, \hat{k})$ 使得 $asInl \xrightarrow{\varphi} Al, asOutn \xrightarrow{\varphi} An, asOutm \xrightarrow{\varphi} Am, asMx \xrightarrow{\varphi} Ax$ 。即 IDEF0 模型中的活动节点之间的输入输出关系对应 CPN 的弧, 输入输出信息在 CPN 中以 SML 语言描述。

第 3 阶段: 定义颜色集。

以 DM 的 IDEF1x 实体关系图的结构定义 CPN 模型的颜色集 Σ 。其中, 关系图中的数据属性映射为简单颜色集, 数据实体映射为复合颜色集。并且为了确保 ROAD 业务架构模型与 CPN 模型之间数据的一致性和可追溯性, 复合颜色集名称必须采用 DM 中的实体名命名, 复合颜色集中的各个子颜色集名称也以 DM 中归属于该实体的各个属性名命名。

第 4 阶段: 建立底层变迁结构。

以 ROAD 元架构模型的 RM 中操作活动的规则描述建立 CPN 模型底层模型的变迁结构。RM 中用 IF-THEN 结构化语言描述的各条规则对应成每个变迁的模版化结构。这些变迁结构的建立过程应该遵循以下 4 步:

a. 为了便于查询, 使用规则名称命名变迁名称。

b. 规则条件关键字 IF 之后的数据实体对应具有相应颜色标签的变迁前集库所, 即输入端口库所、变迁输入弧函数。

c. 将 IF 条件写入对应变迁的警卫函数中, 作为变迁的触发条件。

d. 规则条件关键字 THEN 之后出现的数据实体对应成后集库所, 即输出端口库所, 规则输出结果写成变迁输出弧函数。

将以上步骤模版化地应用于建立 CPN 模型中的每个变迁结构。经过以上 4 个阶段, 整个 CPN 建模过程基本完成。

第 5 阶段: 验证模型行为。

根据 ROAD 元架构模型中包含的 AM 的流程轨迹, 再结合 CPN 模型执行记录和仿真报告、图表, 进而核实验证系统的 CPN 可执行模型的逻辑行为的正确性。例如, 以 AM 的 IDEF0 模型中输入输出信息来验证 CPN 模型运行过程中产生的逻辑行为发生序列 OG(occurrence graph) 图, 验证可执行模型的逻辑行为是否与预期的动态行为相符。

综上所述, 由 ROAD 业务架构模型到 CPN 可执行模型的建模过程这 5 个阶段如图 2 所示。

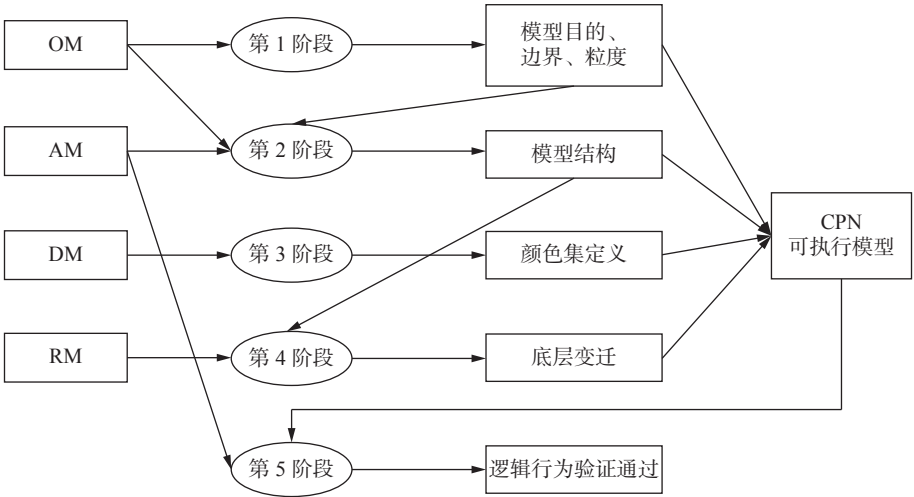


图 2 从 ROAD 模型到 CPN 可执行模型的建模过程

Fig.2 Modeling process from ROAD model to CPN executable model

2 幼儿园智能晨检机器人业务架构建模

自新冠肺炎疫情爆发以来, 防疫智能机器人与医疗技术的有效结合在抗议过程中起到了非常重要的作用。针对智慧学校这一需求, 再结合疫情防控指导工作, 以及 AI 防疫机器人在疫情期间

的突出表现, 越来越多的幼儿园选择具备 AI 智能的晨检机器人为幼儿做好防疫晨检。

2.1 幼儿园智能晨检机器人系统 ROAD 业务架构建模

幼儿园防疫智能晨检机器人的功能分解如图 3 所示。以“体温检测”系统(简称 TD 系统)为例, 基于 ROAD 元架构模型对该系统的业务架构

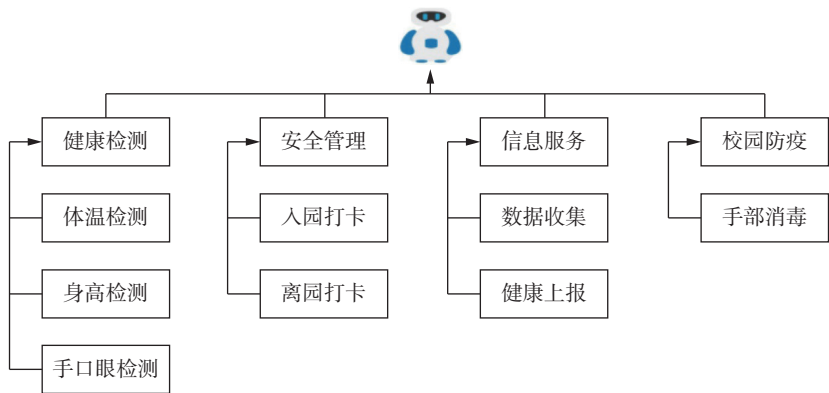


图 3 幼儿园智能晨检机器人功能分解

Fig.3 Functional decomposition of intelligent morning inspection robot in kindergarten

建模为 4 部分，得到体温检测功能的业务组织模型、业务活动模型、业务数据模型、业务规则模型，分别如图 4~6、表 2 所示。其中，图 6 中 Number 为数值，String 为字符串，Datetime 为时间，Boolean 为布尔值。AM 元素说明如表 3 所示。

2.2 幼儿园智能晨检机器人系统 CPN 业务架构建模

现以幼儿园防疫智能晨检机器人的“体温检测”功能 ROAD 模型为例，进一步说明 ROAD 模型到 CPN 可执行模型的建模过程。

建模第 1 阶段，调研系统需求。本文限于篇

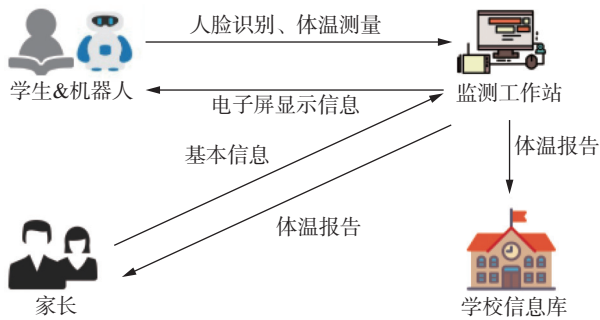


图 4 体温检测功能的业务组织模型

Fig.4 Organization model of temperature detection function

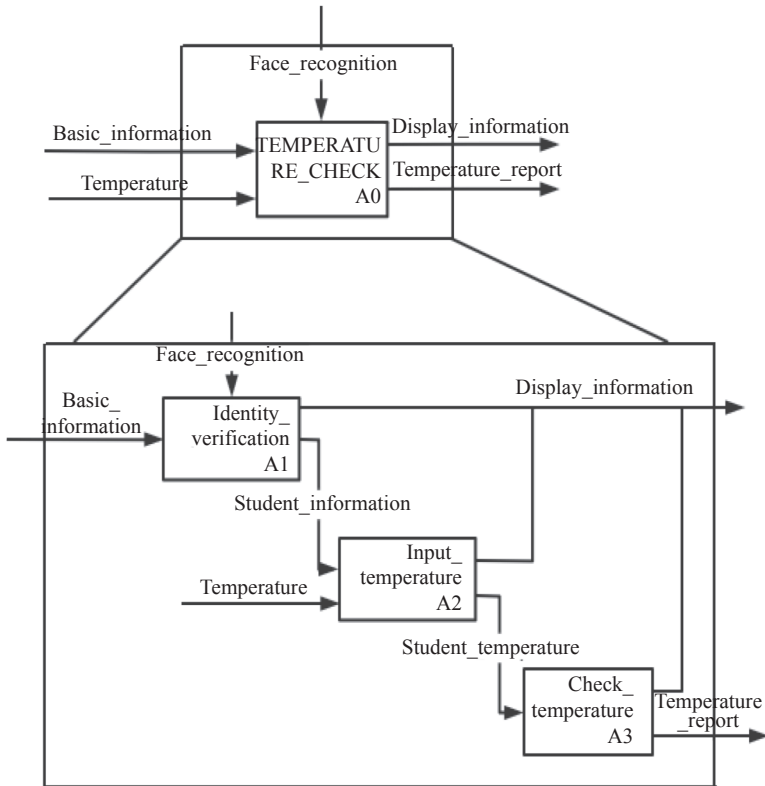


图 5 体温检测功能的业务活动模型(局部)

Fig.5 Activity model of temperature detection function(partial)

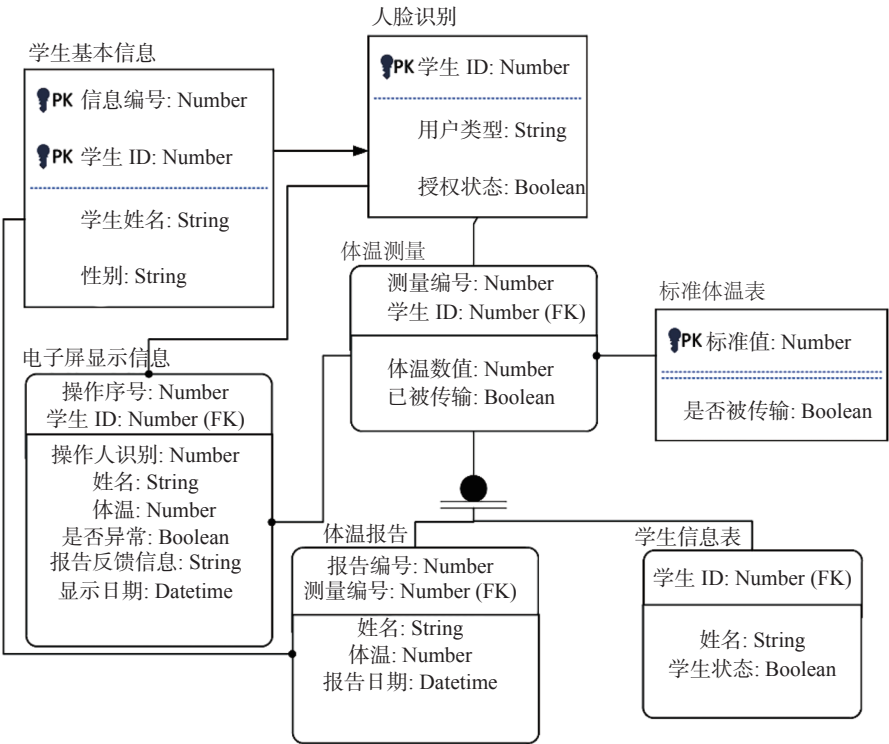


图 6 体温检测功能的业务数据模型

Fig.6 Data model of temperature detection function

表 2 体温检测功能的业务规则模型

Tab.2 Rule model for the temperature detection function

规则名称	If	Then
身份识别	人脸识别.学生编号=基本信息.学生ID	电子屏显示信息.学生姓名=基本信息.姓名
		学生信息表.学生姓名=基本信息.学生姓名
体温输入	学生信息表.学生姓名=体温测量.学生称号	学生体温表.体温=体温测量.学生体温
		电子屏显示信息.体温=体温测量.学生体温
体温检查	体温测量.学生体温>37	电子屏显示信息.学生姓名=学生体温表.姓名
	体温测量.学生体温≤37	体温报告.学生姓名=“不正常” 体温报告.学生姓名=学生体温表.姓名 体温报告.学生体温=学生体温表.体温

幅, 不作详述。

建模第 2 阶段, 确定模型结构。如图 7(a)所示, 依据 ROAD 元架构模型 AM 的 A0 层, 可设置 CPN 模型的顶层页面, 以 TEMPERATURE_CHECK 为变迁。如图 7(b)所示, 将 A1, A2, A3 层映射为 CPN 模型的子层, 其中: 活动 Identity_verification, Check_temperature, Input_temperature 作为变迁; 活动节点之间的输入输出关系作为弧线; 控制要素 Face_recognition、输入信息 Basic_information 和 Temperature、输出信息 display_information 和

表 3 业务活动模型元素说明

Tab.3 Descriptions of activity model elements

名称	说明
Face_recognition	人脸识别
Temperature	体温测量
Basic_information	基本信息
Display_information	电子屏显示信息
Temperature_report	体温报告
Student_information	学生信息表
Student_temperature	学生体温表
Identity_verification	身份识别
Check_temperature	体温检查
Input_temperature	体温录入
TEMPERATURE_CHECK	体温检测

Temperature_report 作为库所。

建模第 3 阶段, 以 DM 的 IDEF1x 实体关系图的结构定义 CPN 模型的颜色集。在 DM 中列举了 7 个实体 Face_recognition, Basic_information, Student_information, Temperature, Student_temperature, Temperature_report, Display_information 之间等关系和各自包含的属性定义。相应地, 在 CPN 模型中严格遵照 DM 中数据结构定义各个颜色集, 列

举其中 2 个实体颜色集定义如表 4 所示。

建模第 4 阶段，建立底层变迁结构。RM 中用 IF-THEN 结构化语言描述的各条规则来描述 TD 系统在各种情况下可能触发的所有行为。列举其中 2 条规则，如表 5 所示，规则 RULE_Identity_verification 和 RULE_Check_temperature，将这些规则分别写到对应的变迁 Identity_verification 和 Check_temperature 上，如图 7(b)所示。

建模第 5 阶段，验证模型行为。本文关注系统 2 个层面的一致性场景验证：a. 数据层的一致性验证，即关注单个学生数据输入与信息库数据之间是否一致；b. 操作层的一致性验证，即关注当同时有多个学生进行“体温检测”并发使用一份数据时，是否能读到相匹配的数据。研究方式为进行学生依次检测和多个学生并行检测，比较两种操作返回结果是否一致。

为了验证该建模方法的可行性，首先描述了对 TD 系统的 ROAD 业务架构模型进行可执行 CPN 建模的详细过程，实现了 ROAD 业务架构模型的可执行化。可执行建模结果如图 7 所示。然

后，将“两名学生进行入园体温检测”的案例数据作为 CPN 模型的初始数据，使之运行得出对应的结果和状态空间报告数据。其中，该两名同学在 TD 系统中会通过初始信息录入姓名、编号和体温，分别为“姓名：Anne；编号：1；体温：39℃”和“姓名：Jeya；编号：2；体温：37℃”。预期结果是体温值大于 37℃ 时会体温警报，并在电子屏幕上显示姓名信息，而体温值小于或等于 37℃ 时将传输体温正常报告。最后，对 CPN 运行结果和状态空间报告数据进行分析。该实验的 CPN 模型运行结果如图 8 所示，结果显示体温为 39℃ 的 Anne 同学触发了体温警报和在电子屏幕上显示姓名信息；Jeya 同学则得到体温正常报告。分析该运行结果可知，此模型运行结果与预期结果数据和行为均一致。该 CPN 模型导出的状态空间报告如图 9 所示，该报告显示了模型的家性、活性和公平性。对活性进行分析可以得知，该模型中死标识(Dead Markings)数量为 0，即不存在未启用的绑定元素；死变迁(Dead Transition Instances)数量为 0，即存在标识中开始并包含一个变迁实例的发生序列。结合运行结果和状态空间报告可

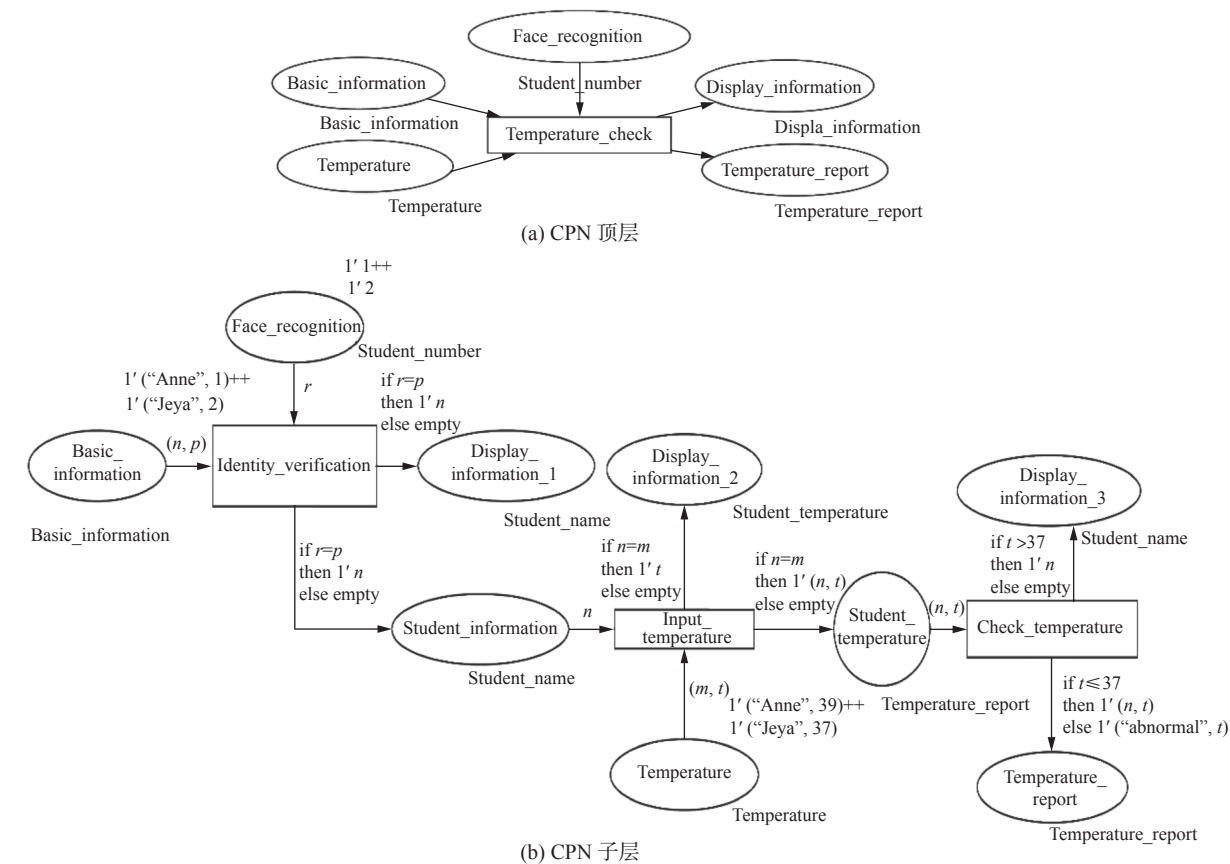


图 7 业务活动模型的 CPN 模型(局部)

Fig.7 CPN model of the business activity model(partial)

表 4 TD 系统的 CPN 模型颜色集定义(局部)

Tab.4 CPN model color set definition of TD system(partial)

数据实体		颜色集定义
实体名	属性名	
Face_recognition	Student_number	colset Student_number=int
	Student_name	colset Student_name=string
Basic_information	Student_id	colset Student_id=int
	Student_name	colset Basic_information=product Student_name*Student_name

表 5 TD 系统的规则(部分)

Tab.5 Rules of TD system(partial)

规则名称	If	Then
RULE_Identity_verification	Face_recognition.	Display_information.
	Student_number=	Student_name=Basic_information.
	Basic_information.	Student_name
	Student_id	Student_name=Basic_information.
RULE_Check_temperature	Student_informati	Student_name
	on.Student_name=	Student_temperature.
	Temperature.	Student_temperature=Temperature.
	Student_	Student_temperature
	designation	Display_information.
		Student_temperature=Temperature.
		Student_temperature

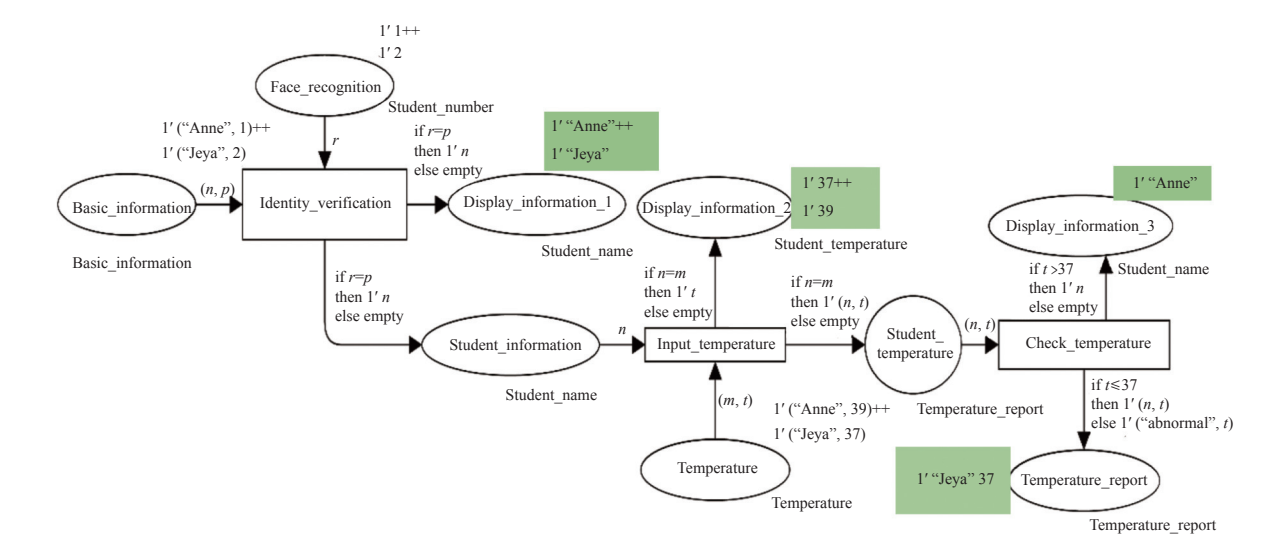


图 8 CPN 模型的 A1, A2, A3 层页面

Fig.8 Pages of A1, A2 and A3 of CPN model

Home Properties	

Home Markings	
All	
Liveness Properties	

Dead Markings	
None	
Dead Transition Instances	
None	
Live Transition Instances	
All	
Fairness Properties	

Impartial Transition Instances	
Fair Transition Instances	
None	
Just Transition Instances	
None	
Transition Instances with No Fairness	
None	

图 9 CPN 模型状态空间报告(部分)

Fig. 9 State space report of CPN model(partial)

知,模型中不存在死循环、死锁及状态空间爆炸等情况。

遵循以上 5 阶段建模方法,由 TD 系统的 ROAD 业务架构模型建立了可执行的 CPN 模型,并且验证了模型与预期系统的数据一致性和逻辑行为一致性,说明这套建模方法和步骤是可行的、有效的。

3 结 论

在研究 TOGAF 业务架构模型描述与 CPN 建模语言两者之间语义对应关系的基础上,提出了一种基于 ROAD 元架构模型的 CPN 可执行模型生成方法。由于对 ROAD 元架构 4 类模型的描述形式不一样,故实现了多种不同体系结构模型语言到 CPN 建模语言的转换,并支持 TOGAF 业务架构模型的动态行为检验和评价。本文未考虑复杂

大规模 ROAD 模型对 CPN 模型转换以及可执行建模效果的影响, 这将需要进一步研究。此外, 跨越多种建模语言体系的语义关系严格对应及其完全形式化定义等研究议题仍具有挑战性, 需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] ZHANG L J. Big services era: global trends of cloud computing and big data[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2012, 5(4): 467–468.
- [2] MEI M, ANDRY JF. The alignment of business process in event organizer and enterprise architecture using TOGAF[J]. *JUTI: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, 2019, 17(1): 21–29.
- [3] 倪枫. SOA 敏捷架构的 TOGAF 层次化迭代建模 [J]. *上海理工大学学报*, 2018, 40(4): 364–370.
- [4] TAO Z G, LUO Y F, CHEN C X, et al. Enterprise application architecture development based on DoDAF and TOGAF[J]. *Enterprise Information Systems*, 2017, 11(5): 627–651.
- [5] 陈长新, 王明哲, 宋阿妮. 利用 DoDAF 开发 TOGAF 定义的企业应用架构设计 [J]. *计算机与数字工程*, 2013, 41(5): 829–834.
- [6] 倪枫, 钟璐, 王波. 基于 ROAD 元架构的企业系统业务架构建模 [J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(3): 262–268.
- [7] 乔嘉林, 黄向东, 杨义繁, 等. 基于着色 Petri 网的 HDFS 数据一致性建模与分析 [J]. *软件学报*, 2021, 32(10): 2993–3013.
- [8] YAN Y Y, CHEN Z Q, LIU Z X. Semi-tensor product approach to controllability and stabilizability of finite automata[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(1): 134–141.
- [9] MURATA T. Petri nets: properties, analysis and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(4): 541–580.
- [10] TALEB-BERROUANE M, KHAN F, AMYOTTE P. Bayesian Stochastic Petri Nets (BSPN)—a new modelling tool for dynamic safety and reliability analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 193: 106587.
- [11] SHAILESH T, NAYAK A, PRASAD D. Transformation of sequence diagram to timed Petri net using Atlas Transformation Language metamodel approach[J]. *Journal of Software: Evolution and Process*, 2022, 34(1): e2412.
- [12] YU W Y, JIA M H, FANG X W, et al. Modeling and analysis of medical resource allocation based on Timed Colored Petri net[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 111: 368–374.
- [13] LIU H C, YOU J X, LI Z W, et al. Fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning: a literature review[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017, 60: 45–56.
- [14] DRAKAKI M, TZIONAS P. A colored petri net-based modeling method for supply chain inventory management[J]. *SIMULATION*, 2022, 98(3): 257–271.
- [15] RIBAS M, FURTADO CG, DE SOUZA JN, et al. A Petri net-based decision-making framework for assessing cloud services adoption: the use of spot instances for cost reduction[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 57: 102–118.
- [16] 李大喜, 杨建军, 许勇, 等. 基于 IDEF0 和 UML 的空基反导军事概念模型 [J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(5): 969–974.
- [17] 周小舟. IDEF0 与 CPN 的自动转换方法研究 [J]. *计算机与数字工程*, 2012, 40(4): 42–44, 125.
- [18] SOARES J A C, LIMA B, FARIA J P. Automatic model transformation from UML sequence diagrams to coloured petri nets[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development*. Funchal, Portugal: SciTePress, 2018: 668–679.
- [19] MEZIANI L, BOUABANA-TEBIBEL T, BOUZAR-BENLABIOD L, et al. From Petri Nets to UML: a new approach for model analysis[M]//BOUABANA-TEBIBEL T, BOUZAR-BENLABIOD L, RUBIN S H. *Theory and Application of Reuse, Integration, and Data Science*. Cham: Springer, 2019: 52–68.
- [20] SHAILESH T, NAYAK A, PRASAD D. An UML based performance evaluation of real-time systems using timed petri net[J]. *Computers*, 2020, 9(4): 94.
- [21] 秦江涛. 基于 Petri 网的生产系统建模与分析研究 [J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(4): 358–367.
- [22] DWORZAŃSKI L W, LOMAZOVA I A. CPN tools-assisted simulation and verification of nested Petri nets[J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2013, 47(7): 393–402.
- [23] MA Z Y, TONG Y, LI Z W, et al. Basis marking representation of petri net reachability spaces and its application to the reachability problem[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(3): 1078–1093.
- [24] HAN L B, XING K Y, CHEN X, et al. A Petri net-based particle swarm optimization approach for scheduling deadlock-prone flexible manufacturing systems[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(5): 1083–1096.
- [25] XIANG D M, LIU G J, YAN C G, et al. Detecting data inconsistency based on the unfolding technique of petri nets[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 2995–3005.
- [26] LIU C, ZENG Q T, DUAN H, et al. Petri net based data-flow error detection and correction strategy for business processes[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 43265–43276.