

# 基于i-BPMN业务架构的CPN可执行建模方法

周宇秀, 倪枫\*, 刘姜, 肖云天, 朱佳怡

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年1月16日; 录用日期: 2023年2月11日; 发布日期: 2023年2月22日

## 摘要

BPMN (Business Process Model and Notation)已成为企业业务架构的主流框架标准。但由于其本身存在的局限性,对业务架构描述存在不足,且无法对业务架构的动态特性进行分析,因此,对于现有的基于TOGAF中ACF元模型提出一种完整覆盖业务架构的i-BPMN建模方法进行研究,建立i-BPMN中的四种模型场景过程模型、活动模型、规则模型以及数据实体模型与CPN (Colored Petri nets)的建模语言间映射关系,实现了架构模型组到可执行模型的转化,提出一种基于i-BPMN业务架构的CPN可执行模型五阶段建模方法,方法过程中采用CPN Tools工具对业务架构进行动态仿真分析。最后,以智慧课堂中“课堂小测”的i-BPMN业务架构为例,验证该方法的可行性和有效性。由于映射过程是一一映射的,为模型组到可执行模型的自动转换提供了技术支持。

## 关键词

BPMN, CPN, 业务架构, 建模方法

# CPN Executable Modeling Method Based on i-BPMN Business Architecture

Yuxiu Zhou, Feng Ni\*, Jiang Liu, Yuntian Xiao, Jiayi Zhu

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 16<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 11<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2023

## Abstract

Business Process Model and Notation (BPMN) has become the mainstream framework standard for enterprise Business architecture. However, due to its own limitations, the description of the business architecture is insufficient, and the dynamic characteristics of the business architecture cannot be analyzed. Therefore, an i-BPMN modeling method based on the ACF metamodel in TOGAF is proposed to completely cover the business architecture. The mapping relationship between scene process model, activity model, rule model, data entity model and CPN (Colored Petri

\*通讯作者。

Nets) modeling language was established in i-BPMN, and the transformation from architecture model group to executable model was realized. A five-stage modeling method of CPN executable model based on i-BPMN business architecture is proposed. CPN Tools is used to dynamically simulate and analyze the business architecture. Finally, the i-BPMN business architecture of “classroom quiz” in smart classroom is taken as an example to verify the feasibility and effectiveness of this method. Since the mapping process is one-to-one, it provides technical support for automatic transformation of model groups into executable models.

## Keywords

BPMN, CPN, Business Architecture, Modeling Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

现如今,我国信息技术的发展迅速,系统架构在我国企业中高速发展。针对业务架构描述存在许多建模定义语言,其中 BPMN2.0 [1]由于既融合了图像化设计思想、UML [2]的面向对象的设计思想,同时减少业务与 IT 用户之间的混乱,在业务架构建模中被广泛使用。

但是 BPMN 标准提出的业务架构建模只是业务架构的静态描述,由于业务架构本身理应是动态的,各个对象之间的作用由相应事件的发生而触发,进而带动相应事件的执行。为了完成业务架构的动态仿真和分析,因此我们还需要建立 BPMN 的可执行模型。

就此问题,已经有学者开展了相关研究,Zafar [3]等人提出从高级 BPMN 模型自动生成 Web 服务,Yong [4]等人对业务流程的可执行性模型构建运用是 Uni-Flex View 框架,Eduardo Díaz [5]等人将 BPMN 映射到图形用户界面(GUI),代飞[6] [7]等人对 BPMN 中的元素制定映射规则,由此建立 CPN 可执行模型的方法。基于上述研究,本文选取 CPN 作为可执行模型。同时,Umair [8]、Li [9]等人对 CPN 构建 BPMN 的可执行模型方法做了进一步的研究。Zhong [10]、Dec [11]、Nao [12]、F Corradini [13]等人侧重研究运用 CPN 对 BPMN 活性,可达性,正确性子流程进行分析。

随着业务架构的不断发展,在确保必要信息完整性的前提下,人们逐渐难以通过单一的架构模型对其进行模拟表达的问题。因此我们需要引入其他模型对 BPMN 的语义进行补充。为了解决 BPMN 模型对业务架构描述能力上的存在一些不足。国内外多名学者也做了相关研究,比如提出了通过将附加属性和元素附加到现有 BPMN 元素的方法,对 BPMN 模型进行视角拓展,如 BPMN-E2 [14]、u-BPMN [15],对医院流程的 BPMN 符号改进方法[16]等等。但各类拓展均特定于某个过程或企业,无法将补充的符号通用化。所以本文引入 i-BPMN [17]系统架构,其在 BPMN 描述业务架构的基础上,采用集成体系的思想,结合 IDEF0、if-else 语句以及 IDEF1x 建模方法,对 BPMN 中结构层次性,数据复杂性等任务进行建模补充,建立一组多视角、易操作且通用性强的 i-BPMN 模型组。i-BPMN 中的四种模型分别是场景过程模型、活动模型、规则模型以及数据实体模型。对于 IDEF0 的可执行模型的研究。倪枫[18]、周小舟[19]等人分析 IDEF0 与 CPN 两者之间的语义对应关系,提出 IDEF0 与 CPN 之间的层次化映射与自动转换。但上述研究中,不管是 BPMN 的可执行模型的建立,还是 IDEF0 的可执行模型的建立,都只是单一架构模型到可执行模型的生成,因此,为了解决这一问题,本文提出基于 i-BPMN 的业务架构 CPN 可执行建模方法。此方法实现了多个架构模型到可执行模型的生成,基于建模过程是一一映射的,为模型组到可

执行模型的自动转换提供了技术支持。同时完善了 i-BPMN 建模方法, 通过模型可执行化, 验证和分析 i-BPMN 的动态特性, 使得 i-BPMN 建模方法能够适用于更多场景下。

## 2. 相关基础

CPN 应用领域包括分布式算法, 数据网, 通信协议及嵌入式系统。同时也广泛地适用于以交互性和并发性为主要特点的架构建模。CPN 是普通 petri 的高级形态, 主要增加了颜色集和网络分层的两部分功能。通过对库所加入颜色集和相应的令牌标定系统当前状态。同时每个库所都绑定特定的颜色集, 表示该库所只能存放相应颜色的令牌。CPN 的变迁上和弧上写条件表达式和函数。说明弧的颜色集和权值, 以及触发变迁的约束条件。CPN 被认为是建立复杂架构建模和仿真分析的最佳工具。CPN 建立的模型是可执行的, 可以对模型进行动态仿真。标记的颜色集可以是任何复杂的数据, 由此提高模型对数据的处理能力, 简化了模型的复杂度。同时, CPN 具有分层框架的功能, 将架构从顶层到底层, 从整体到局部, 从粗到细, 逐步细化, 突出重点。

定义 1 (CPN 形式化定义)

$$CPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I)$$

- $\Sigma$  为有限非空“类”集合, 称之为颜色集,  $P$  为有限非空库所元素集合;  $T$  为有限非空变迁元素集合;  $A$  为弧集合;  $N$  为节点;  $C$  是库所的颜色集函数,  $G$  是变迁的警卫函数;  $E$  为弧表达式函数;  $I$  是初始化函数, 即初始标示;
- $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$
- $N: A \rightarrow P \times U \cup T \times P$
- $C: P \rightarrow \Sigma$
- $G: T \rightarrow expr$  ( $expr$  即表达式)
- $\forall t \in T: [Type(G(t)) = B \wedge Type(Var(G(T))) \subseteq \Sigma]$  其中  $B$  是 BOOL 函数,  $Var()$  表示变量,  $Type()$  表示类型(type);
- $E: A \rightarrow expr$
- $\forall a \in At: [Type(E(a)) = C(p(a))ms \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$
- $I: P \rightarrow expr: \forall p \in P [Type(I(p)) = C(P)_{MS}]$  其中  $P$  是  $N(a)$  的库所集元素, 下标  $MS$  为多重集函数;

定义 2 (BPMN 形式化定义)

$$BPMN = (P, G, E, S, M)$$

BPMN2.0 流元素是活动、事件、网关、序列流和序列流。其中: 其中  $P$  表示活动的集合、 $G$  表示网关的集合、 $E$  表示事件的集合,  $S$  表示顺序流、 $M$  表示消息流。

## 3. i-BPMN 到 CPN 建模方法

i-BPMN 是一个集成了场景, 功能, 规则以及数据视角的模型组。在 BPMN 原有的基础上, 引入数据库概念中一种建模方法 IDEF1x, 补充数据视角; 引入 if-else 语句描述业务流程的业务规则, 补充规则视角; 引入具有分层结构的 IDEF0 建模方法。补充 BPMN 模型的层次性功能。逐步精化, 突出重点。但由于 i-BPMN 模型组只能分析静态模型的关键缺陷, 因此, 本文将 i-BPMN 映射为 CPN 可执行动态模型。首先从场景过程模型(BPMN)和活动模型(IDEF0)中得到 CPN 模型的框架信息, 其次从规则模型(if-then-else)中得到 CPN 模型的约束信息, 再从数据模型(IDEF1x)中得到 CPN 模型的数据域信息。最后获得 i-BPMN 对应的 CPN 模型, 运行该模型, 从它的运行过程和运行结果中, 可以对 i-BPMN 的逻辑、行为和数据库域等信息进行验证。以 i-BPMN 建模方法和 CPN 两者的语义为基础, 将 i-BPMN 模型组一一

映射到 CPN 中。我们将 i-BPMN 建模方法映业务映射到 CPN 的具体过程分为五个阶段，其核心思想是以场景过程模型为主体，活动模型为补充的 CPN 模型框架的建设，以数据实体模型为主体的 CPN 颜色集的定义，以规则模型为主体的 CPN 中的弧函数规则的嵌入。具体过程分为以下五个阶段：

### 3.1. 构建 CPN 框架

设  $\varphi$  为 BPMN 模型与 CPN 模型之间的映射，即  $\varphi: \text{BPMN} \xrightarrow{\varphi} \text{CPN}$ 。该映射规则遵循如下规则：

a)  $P_i \xrightarrow{\varphi} T_i$ ,  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ ,  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ 。即 BPMN 模型中的任意活动均映射为 CPN 的变迁；

b)  $E_i \xrightarrow{\varphi} T_i$ ,  $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$ ,  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  即 BPMN 模型中的任意事件均映射为 CPN 中对应的变迁；

c)  $S_i \xrightarrow{\varphi} A_i$ ,  $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$ ,  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ ，即 BPMN 模型中的顺序流映射为 CPN 中对应的弧。

**Table 1.** Mapping between product components of the scenario process model and CPN model units

**表 1.** 场景过程模型产品组件与 CPN 模型单元的对应

	场景过程模型产品组件	CPN 模型组成元素
开始事件		
结束事件		
中间事件		
活动		
排他数据网关		
排他数据合并网关		
排他事件决策网关		
排他事件合并网关		
并发分叉网关		
并发汇聚网关		

基于上述定义,以场景过程模型(BPMN)为依据,构建 CPN 的基础框架,其中事件包括开始事件,中间事件,结束事件。网关分为排他数据(事件)决策网关,排他数据(事件)合并网关,并发分叉网关,并发汇聚网关。BPMN 与 CPN 模型之间的语义映射关系,如表 1 所示。

CPN 基础框架建立过程应遵循以下步骤:

- 1) 将场景活动模型按照流元素的分类进行拆分。
- 2) 将拆分后的场景过程模型各个片段按照表 1 的对应关系进行一一映射。开始事件映射的变迁元素以 Start 命名,结束事件映射的变迁元素以 End 命名。活动映射的变迁元素以该活动名称来命名。
- 3) 最后运用库所融合技术[6]将对应的 CPN 元素片段进行组合。形成场景过程模型对应的 CPN 基础框架。

### 3.2. 确定 CPN 结构

定义 3 (IDEF0 形式化定义)

$$IDEF0 = (In, Con, Out, M, Act)$$

将基于 IDEF0 所描述的模型表示为一个五元组形式,  $In$ 、 $Out$ 、 $Con$ 、 $M$ 、 $Act$  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)。

设  $\varphi$  为 IDEF0 模型与 CPN 模型之间的映射, 即  $\varphi: IDEF0 \rightarrow CPN$ 。该映射规则遵循如下规则:

- a)  $Act_i \xrightarrow{\varphi} T_i$ ,  $Act = \{act_1, act_2, act_3, \dots, act_n\}$ ,  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  即 IDEF0 模型中的任意活动均映射为 CPN 中的变迁;
- b)  $In_i \xrightarrow{\varphi} P_i$ ,  $Out_i \xrightarrow{\varphi} P_i$ ,  $In = \{in_1, in_2, in_3, \dots, in_n\}$ ,  $Out = \{Out_1, Out_2, Out_3, \dots, Out_n\}$ ,  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ , 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;
- c)  $Con_i \xrightarrow{\varphi} P_i$ ,  $Con = \{con_1, con_2, con_3, \dots, con_n\}$ , 即对于 IDEF0 模型中的控制要素, 映射为 CPN 的库所;
- d)  $M_i \xrightarrow{\varphi} P_i$ ,  $M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}$ , 即对于 IDEF0 模型中的机制要素  $M$ , 它表示的是活动  $Act$  所需要的资源, 映射为 CPN 中的库所;

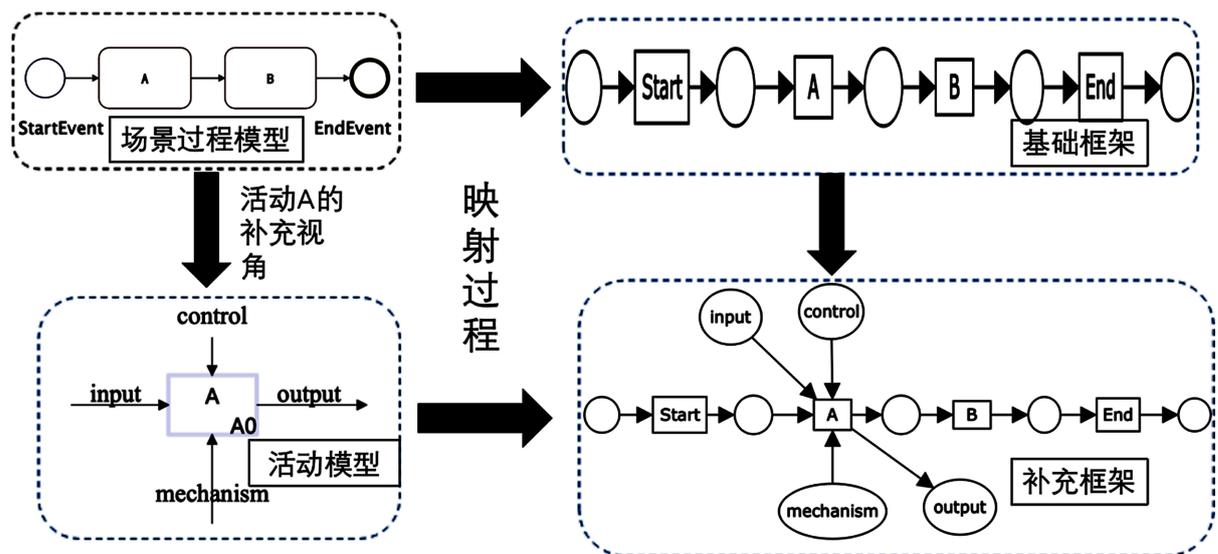


Figure 1. Correspondence between IDEF0 and CPN model  
图 1. IDEF0 与 CPN 模型的对应关系

在 CPN 基础框架的基础上, 依据活动模型(IDEF0)对 CPN 结构进行完善。i-BPMN 中的活动模型是对场景过程模型的视角补充, 如图 1 所示, 场景过程模型对应基础框架, 活动 A 和活动 B 分别对应变迁 A 和 B, 采用 IDEF0 模型对活动 A 进行视角补充, 根据 CPN 基础框架, 找到对应的变迁 A, 接下来按照映射规则对 IDEF0 的元素进行一一映射, 第一, IDEF0 中的 Input, Output 表示输入输出信息或资源, 映射为 CPN 的库所, 库所名称以输入输出名称命名。第二, IDEF0 中 Controls 是指活动的约束条件, 映射为 CPN 中的库所, 一些情况下, Controls 还需要映射为 CPN 中的 guard 函数, guard 函数大多采用 if-then 函数来控制令牌的流动。第四, 对于 IDEF0 中的 mechanism, 他表示为活动提供支持的手段, 包括活动所需的人员, 设备及装备等。机制映射为 CPN 中的库所。依据上述步骤, 确定 CPN 的结构。

### 3.3. 定义颜色集

根据数据实体模型(IDEF1x)来定义 CPN 模型的颜色集, CPN 颜色集的名称必须采用数据实体模型的实体名名称, 颜色集中各个子颜色集以该实体的各个属性名命名。由此可以确保 i-BPMN 和 CPN 模型之间数据的一致性和可追溯性。同时, 颜色集的命名也需符合 CPN Tools 的命名规则。通过第三阶段, CPN 中所有库所的颜色集标签都应该被赋予具体的定义。

### 3.4. 建立底层规则

规则模型(if-then-else)规定了业务活动的触发规则, 描述了触发事件和业务规则以及两者之间的联系。第四阶段, 首先, 依据规则模型, 将规则映射为触发事件对应 CPN 变迁中的输出弧上, 映射为输出弧的弧函数。通过弧函数控制令牌的流动。或者将规则作为一个变迁, 并以这个规则名称来命名该变迁, 该规则变迁的输入弧上输入规则的前提条件函数, 该规则变迁输出弧上写该规则的结果函数。最后, 在没有规则函数的输入弧上均需关联前集库所, 后集库所颜色集对应的变量, 必须保证有向弧上的变量和库所颜色集的一致性。令牌能够在模型中顺利流动, 否则 CPN 模型采用代码形式进行报错。经过以上四个阶段, 整个 CPN 建模过程基本完成。

### 3.5. 验证模型行为

CPN 建模系统的状态是依据库所状态代表的。每一个库所可以存放一个或多个令牌(tokens)标示, 令牌类型由该库所的颜色集决定, 令牌的颜色是指令牌自身携带的数据值。每一个单独库所的令牌数量和

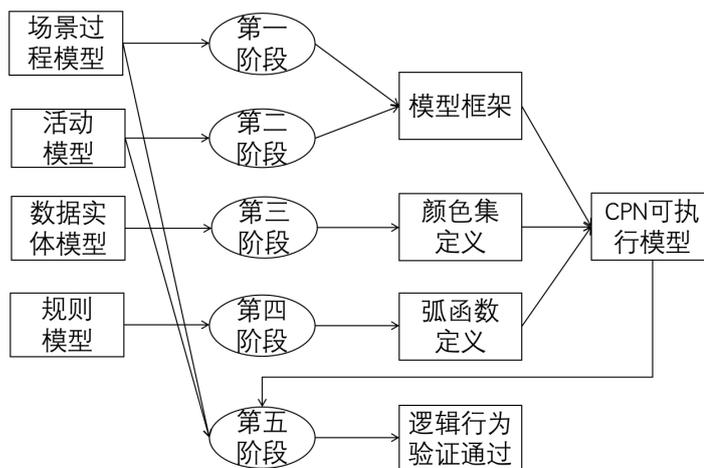


Figure 2. Shows the five phases of the i-BPMN to CPN executable model  
图 2. i-BPMN 到 CPN 可执行模型的五个阶段

令牌颜色组合在一起,构成了该系统的状态(marking)。验证模型行为,在系统的库所中加入相应的令牌,通过令牌的动态变化能够反映 CPN 执行情况。通过 CPN 的执行记录验证模型的逻辑是否与预期一致,仿真结束后,结合 CPN Tool 生成的状态空间报告、状态图和 OG 图等,报告给出 CPN 模型的数学性质,包括可达性、有界性和活性等,以此判断模型的正确性。将以上步骤模版化地应用建立 CPN 可执行模型。

综上所述,由 i-BPMN 到 CPN 可执行模型的建模五个阶段如图 2 所示。

#### 4. 智慧课堂的业务架构 CPN 建模过程

智慧教育[20]的真谛是通过互联网,大数据技术结合到学习中,让教师们能够更加高效的分析学生的学习情况,对症下药。让学生能够获得合适的个性化学习服务,使得学生的潜能从无到有,从小到大,从而培养出具有创新能力,社会所需要的复合型人才。以下图 3 是智慧课堂的业务功能,为了更好说明建模映射过程,我们以基本业务“课堂小测”为例,进行 i-BPMN 建模过程。第一阶段,顶层架构阶段。构建出一个顶层框架,即场景过程模型如图 4 所示。

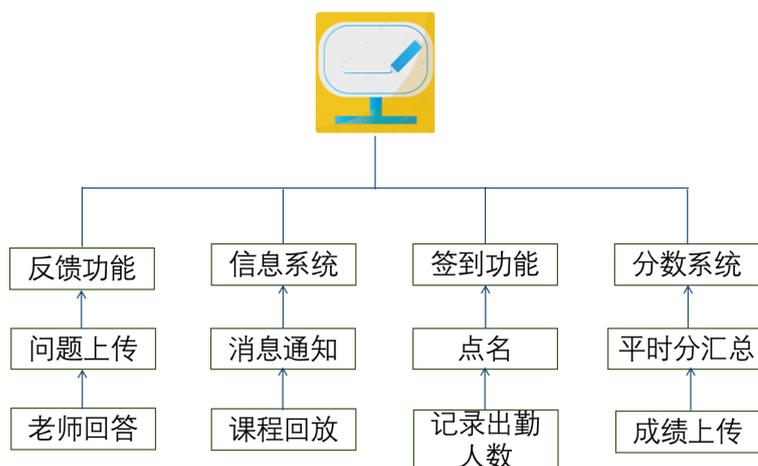


Figure 3. Basic business decomposition of wisdom class  
图 3. 智慧课堂基本业务分解

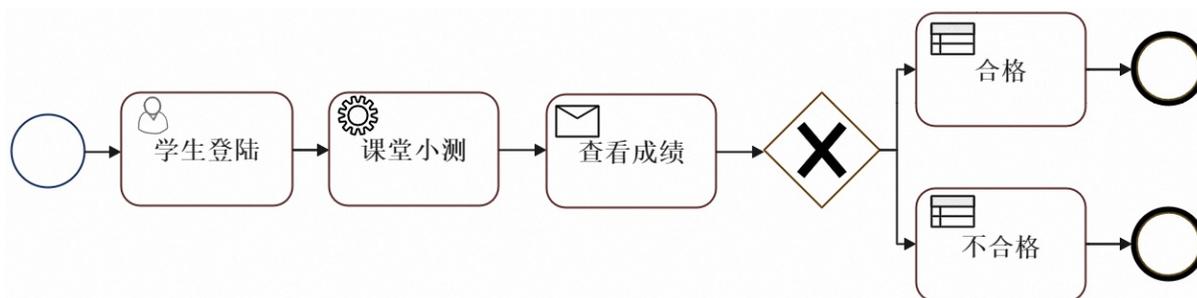


Figure 4. Scene process model of "Classroom quiz"

图 4. “课堂小测”的场景过程模型

第二阶段,环形建模阶段,根据业务需求,补充业务架构的新视角。即加入活动模型、规则模型以及数据实体模型。在此阶段中,下层的数据域和业务规则补充并完善了顶层的 BPMN 流程模型,每创建一个新的模型,都进入第三阶段,进行“粒度”的对齐,在建模初期阶段,需要多次迭代。模型经过多次修改。形成建模过程的“闭环”。

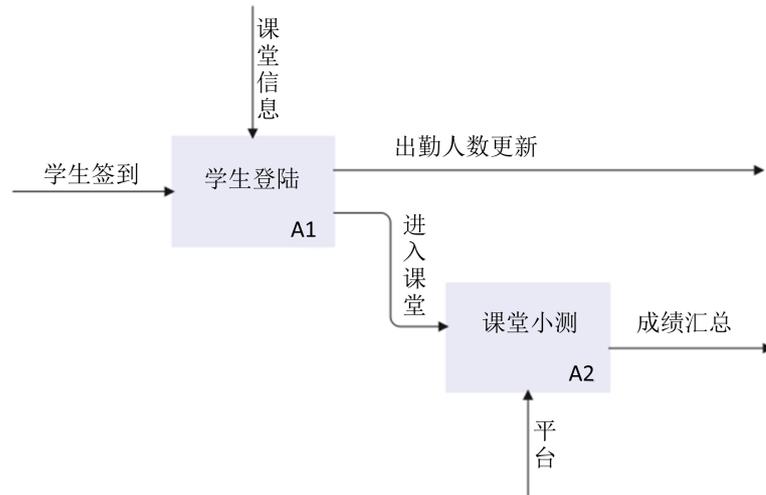


Figure 5. Business activity model of “classroom quiz”  
图 5. “课堂小测”的业务活动模型

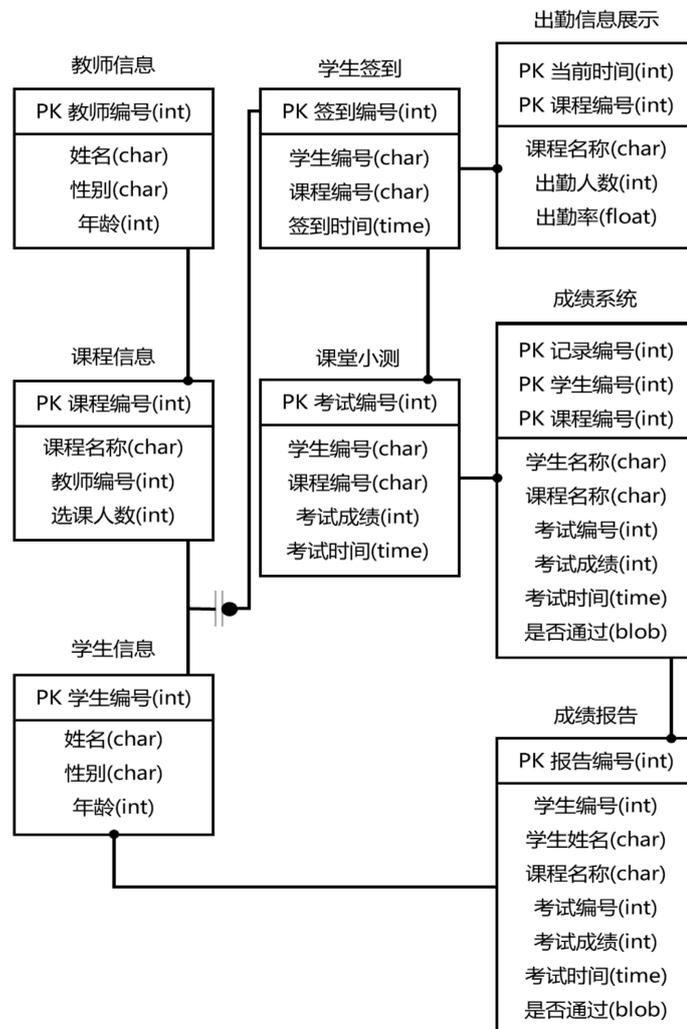


Figure 6. Data entity model of “Classroom quiz”  
图 6. “课堂小测”的数据实体模型

第三阶段，“粒度”对齐阶段，在同一轮迭代中，i-BPMN 各视角相应的模型在同一层次、同一水平上对业务架构进行描述。通过不断修正模型间粒度以及语义的基础上，找到描述业务流程的最佳粒度平衡点。

第四阶段，迭代调整阶段，通过重复前三个步骤，不断迭代，不断的修改直至构建出多视角、粒度对齐且能够满足不同粒度需求的多维度，多视角的业务流程模型组——i-BPMN 模型组。“课堂小测”业务的活动模型如图 5 所示，“课堂小测”业务的数据实体模型如图 6 所示。表 2 中例举了“课堂小测”业务规则模型。

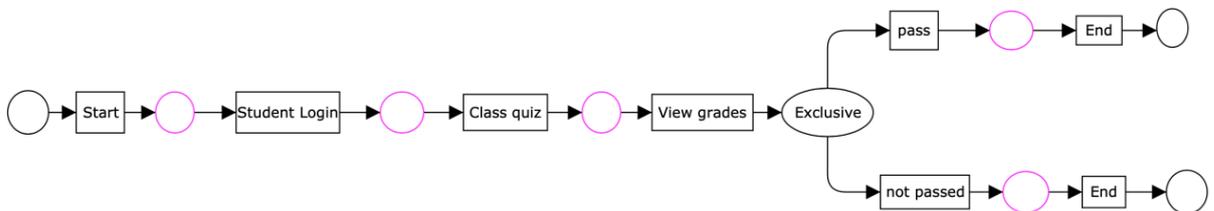
以“课堂小测”i-BPMN 建模方法为例，进一步说明，i-BPMN 建模方法可执行模型的建模过程，使用的工具软件是 CPN Tools。

**Table 2.** “Classroom quiz” business rule model  
**表 2.** “课堂小测”业务的规则模型

规则名称	规则内容
Rule_login “学生登陆”规则	IF 课程系统。授权状态 = 1 And 学生系统。学生信息 = 课程系统。学生信息 THEN 课程系统。操作提示信息 = “登陆成功”
Rule_grade_1 “成绩输出”规则	IF 课程系统。授权状态 = 1 And 学生系统。授权状态 = 1 And 课程系统。小测成绩 ≥ 60 THEN 学生系统。任务状态 = “成绩合格”
Rule_grade_2 “成绩输出”规则	IF 课程系统。授权状态 = 1 And 学生系统。授权状态 = 1 And 课程系统。小测成绩 ≤ 60 THEN 学生系统。任务状态 = “成绩不合格”

### 4.1. 构建“课堂小测”CPN 的基础框架

将过程场景模型按照 2.1 的映射规则，得到 CPN 框架如图 7 所示。其中开始事件，结束事件分别对应的是变迁是“Start”，“End”。网关对应的是库所“Exclusive”。中间事件“学生签到”“课堂小测”“查看成绩”“合格”“不合格”分别对应的是变迁“Students Log in”“Class quiz”“View grades”“pass”“not passed”。图中红色库所是相邻活动对应的变迁前后库所融合的结果。



**Figure 7.** CPN model of “Classroom quiz” system (framework)  
**图 7.** “课堂小测”系统 CPN 模型(框架)

### 4.2. “课堂小测”CPN 的结构

活动模型是对场景过程模型视角的补充，按照 2.2 的步骤，“课堂小测”活动模型活动框“学生登陆”在过程场景模型中对应活动“学生登陆”活动，对应的变迁是“Students Log in”，同理，活动框课

堂小测对应的变迁是“Class quiz”。再依据映射规则，加入控制元素“课堂信息”对应的库所“Class information”。其对应的警卫函数放在规则模型的映射过程中加入。机制“平台”对应的是库所“System”。输出“出勤人数实时更新”“成绩汇总”分别对应库所“Attendance is update”“Summary of grades”。输入“学生签到”“进入课堂”对应库所“Students sign in”“Enter classroom”，如图 8 所示。

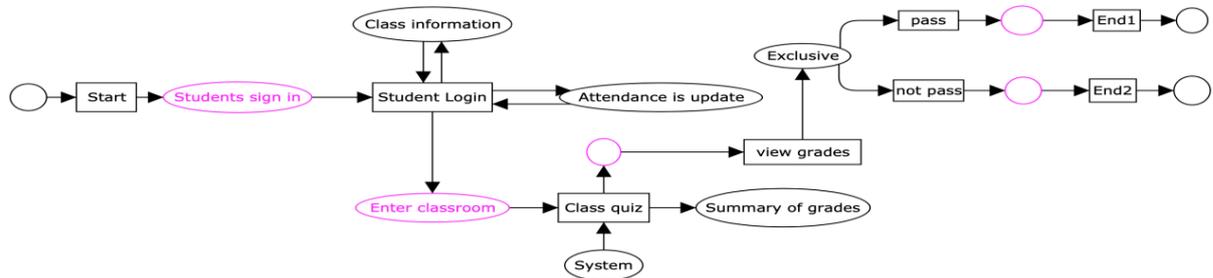


Figure 8. CPN model of “Classroom quiz” system (structure)

图 8. “课堂小测”系统 CPN 模型(结构)

### 4.3. 定义“课堂小测”CPN 的颜色集

建模第三阶段，在“智慧课堂”的数据模型中列举三个数据实体“Student”“Class”“System”定义 CPN 中各个颜色集，他们各自的属性对应其颜色集的子集，以上三个数据实体的 CPN 颜色集定义如表 3 所示。本文篇幅有限，只列举了部分颜色集。

Table 3. Color set of “Classroom quiz” business

表 3. “课堂小测”业务的颜色集

数据模型定义		CPN 颜色集定义
实体名	属性名	
Student	Student_Name	$\text{closetStudent\_Name}=\text{string};$ $\text{var n:Student\_Name};$ $\text{closetStudent\_id}=\text{int};$ $\text{var p:Student\_id};$ $\text{closetStudent\_information}$ $=\text{product Student-Name*Student-id};$
	Student_id	
	Student_grade	$\text{closetGrade}=\text{int};$ $\text{closetStudent\_grade} =$ $\text{product Studen\_Name*Grade};$ $\text{var g: student\_grade};$
Class	Class_num	$\text{closetClass\_num}=\text{int};$ $\text{var c:Class\_num};$
System	Class_information	$\text{closetClass\_information}=\text{int};$ $\text{var i:Class\_information};$

### 4.4. 定义“课堂小测”CPN 的底层规则

建模第四阶段，建立 CPN 的底层规则，依据 2.4，将规则映射到 CPN 的弧函数，同时其余有向弧上依据前后前集库所，后集库所的颜色集依次加入变量值，使得 CPN 变迁能够依据前集库所和后集库所相

应的颜色集删除或生成 token。将表 2 的规则模型映射到 CPN，如下图 9 所示。

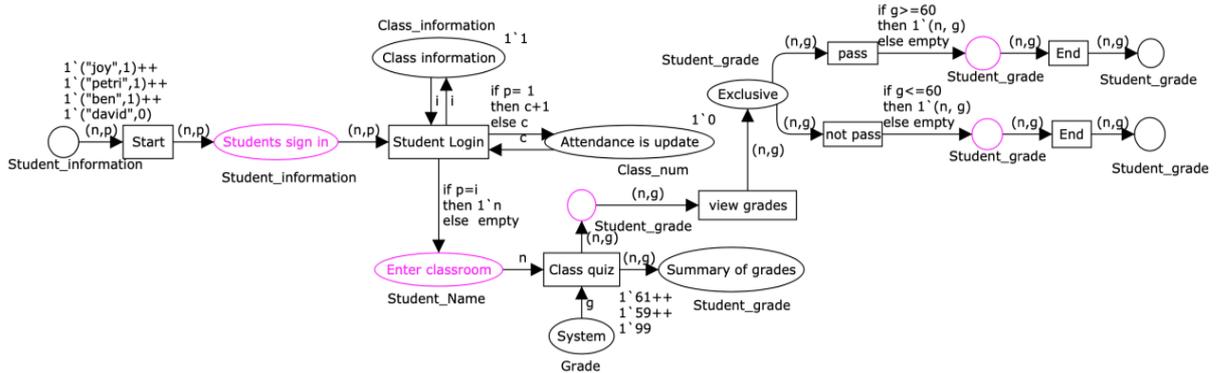


Figure 9. CPN model of “Classroom quiz” system (initial state)  
图 9. “课堂小测”系统 CPN 模型(初始状态)

#### 4.5. 验证模型行为

依次向相关库所里加入相应的 token。在 Start 前集库所加入令牌，如图 9。“1`("joy",1)++1`("petri",1)++1`("ben",1)++1`("david",0)”分别代表四个学生 Joy, Petri, Ben, David, 他们的学生信息简化用 0, 1 代表, 1 代表正确的学生信息, 0 代表错误的学生信息。在库所“Class information”中加入 token “1`1”代表正确的学生信息 1。在库所“Attendance”中加入 token “1`0”。代表在当前状态下签到人数为零。在库所“system”中加入 token “1`61++1`59++1`99”代表学生的成绩。接着进行仿真模拟。仿真结果得到结果图 10, 可以看到结果, 3 位同学的学生信息正确, 登陆成功 3 位, 出勤人数更新为正确的出勤人数, 显示为“1`3”, 分数 61 分和 99 分进入 pass 库所所在那条路径, 59 分进入 not passed 库所所在那条路径。最后到达各自的结束事件的变迁的后集库所。依据仿真执行记录, 模型的动态行为与预期一致。验证模式依靠状态空间生成器来构造状态空间图, 由节点和边组成。节点或标记表示系统的状态, 而边表示状态转换, 状态转换是转换的触发信息, 称为绑定元素。在状态空间上解释的函数命令和时间公式用于创建用于状态空间探索的查询。CPN 的状态空间报告见图 11。状态分析报告说明表明该模型中没有不必要的循环, 死锁, 状态空间爆炸, 验证模型是正确的。

遵循以上的建模方法, 我们由 i-BPMN 建立可执行模型 CPN 模型, 并且验证了模型与预期的逻辑行为一致性, 说明这套建模步骤是行之有效的。

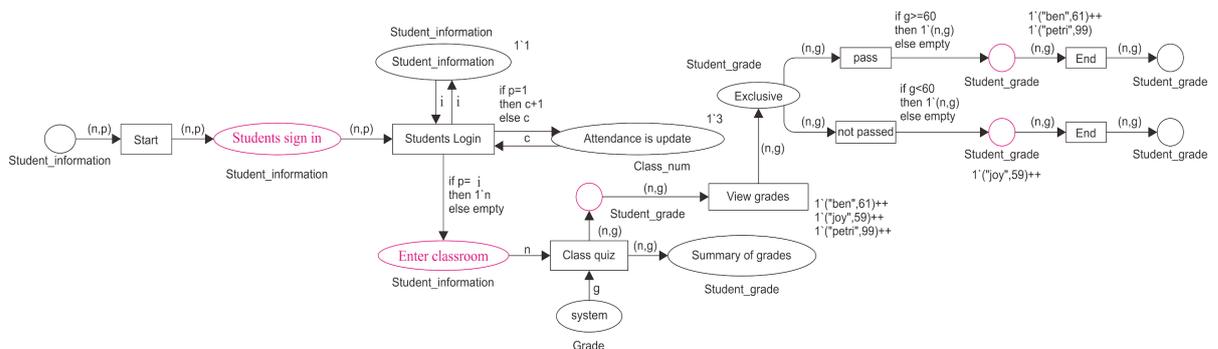


Figure 10. CPN model of “Classroom quiz” system (simulation results)  
图 10. “课堂小测”系统 CPN 模型(仿真结果)

```

Best Upper Multi-set Bounds
New_Page'Grades_displayed 1
                        empty
New_Page>Login_successful 1
                        empty
New_Page'Not_passed 1
New_Page'Pass 1        empty
New_Page'Student_grade 1
                        1`59++
1`61++
1`99
New_Page'Student_information 1
                        1`1
New_Page'Students 1 1`("ben",1)++
1`("david",0)++
1`("joy",1)++
1`("petri",1)
New_Page'Summary_of_grades 1
                        empty
New_Page'Update_attendance_in_real_time 1
                        1`0

Best Lower Multi-set Bounds
New_Page'Grades_displayed 1
                        empty
New_Page>Login_successful 1
                        empty
New_Page'Not_passed 1
                        empty
New_Page'Pass 1        empty
New_Page'Student_grade 1
                        1`59++
1`61++
1`99
New_Page'Student_information 1
                        1`1
New_Page'Students 1 1`("ben",1)++
1`("david",0)++
1`("joy",1)++
1`("petri",1)
New_Page'Summary_of_grades 1
                        empty
New_Page'Update_attendance_in_real_time 1
                        1`0

```

**Figure 11.** CPN state space report of “Classroom Quiz” system (local)

**图 11.** “课堂小测” 系统 CPN 状态空间报告(局部)

## 5. 结论

本文在研究 i-BPMN 与 CPN 建模语言两者之间语义对应关系的基础上, 提出 i-BPMN 到可执行模型 CPN 的五阶建模法, 实现模型组到 CPN 可执行模型的转换, 支持集成架构模型的动态行为检验和评价。但是在本文中, 本文只是研究了过程场景模型(BPMN)中的流程视图, 并未对 BPMN 中编排图和协作图做出相应的映射。下一步, 我们将继续研究 i-BPMN 中过程场景模型存在协作图, 编排图时, i-BPMN 的动态可执行模型的建设。

## 参考文献

- [1] OMG (2011) Business Process Model and Notation (BPMN) Version 2.0.
- [2] Dijkman, R.M., Dumas, M. and Ouyang, C. (2008) Semantics and Analysis of Business Process Models in BPMN. *Information & Software Technology*, **50**, 1281-1294. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.02.006>
- [3] Zafar, I., Azam, F., et al. (2019) A Novel Framework to Automatically Generate Executable Web Services from BPMN Models. *IEEE Access*, **7**, 93653-93677. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927785>

- 
- [4] Yongchareon, S., Liu, C.F. and Zhao, X.H. (2020) UniFlexView: A Unified Framework for Consistent Construction BPMN and BPEL Process Views. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, **32**, e5646. <https://doi.org/10.1002/cpe.5646>
- [5] Díaz, E., et al. (2020) An Empirical Study of Rules for Mapping BPMN Models to Graphical User Interfaces. *Multimedia Tools and Applications*, **80**, 9813-9848.
- [6] Li, L. and Dai, F. (2018) Transformation and Visualization of BPMN Models to Petri Nets. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **186**, Article ID: 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/5/012047>
- [7] Da, I.F., Zhao, W.Z., Yang, Y., et al. (2018) Formal Semantics and Analysis of BPMN 2.0 Choreographies.
- [8] Umair, M., Kamel, B., Li, Z., et al. (2018) Transformation of Business Process Model and Notation Models on to Petri Nets and Their Analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, **10**, 668-688. <https://doi.org/10.1177/1687814018808170>
- [9] Li, Z.H. and Ye, Z.W. (2021) A Petri Nets Evolution Method that Supports BPMN Model Changes. *Scientific Programming*, **2021**, Article ID: 6610795. <https://doi.org/10.1155/2021/6610795>
- [10] Zhong, C., He, W., Li, Z., et al. (2019) Deadlock Analysis and Control Using Petri Net Decomposition Techniques. *Information Sciences*, **482**, 440-456. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.01.029>
- [11] Dechsupa, C., Vatanawood, W. and Thongtak, A. (2019) Hierarchical Verification of the BPMN Design Model Using the State Space Analysis. *IEEE Access*, **7**, 16795-16815. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892958>
- [12] Naoum, M., Hichami, O.E., Achhab, M.A., et al. (2016) A Probabilistic Method for Business Process Verification: Reachability, Liveness and Deadlock Detection. *IEEE International Colloquium on Information Science & Technology*, Tangier, 24-26 October 2016, 128-132. <https://doi.org/10.1109/CIST.2016.7805029>
- [13] Corradini, F., Morichetta, A., Polini, A., et al. (2020) Correctness Checking for BPMN Collaborations with Sub-Processes. *Journal of Systems and Software*, **166**, Article ID: 110594. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110594>
- [14] Ramos-Merino, M., Santos-Gago, J.M., et al. (2019) BPMN-E2: A BPMN Extension for an Enhanced Work Flow Description. *Software & Systems Modeling*, **18**, 2399-2419. <https://doi.org/10.1007/s10270-018-0669-2>
- [15] Yoursfi, A., Bauer, C., Saidi, R., et al. (2016) uBPMN: A BPMN Extension for Modeling Ubiquitous Business Processes. *Information & Software Technology*, **74**, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2016.02.002>
- [16] Onggo, B.S., et al. (2018) A BPMN Extension to Support Discrete Event Simulation for Healthcare Applications: An Presentation of Queues, Attributes and Data-Driven Decision Points. *Journal of the Operational Research Society*, **69**, 788-802. <https://doi.org/10.1057/s41274-017-0267-7>
- [17] 陈蕾, 倪枫. 基于 i-BPMN 的翻转课堂教学系统业务流程建模[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9(4): 180-186, 191.
- [18] 倪枫, 王明哲, 周丰, 等. 可执行体系框架的 HCPN 建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(5): 959-965.
- [19] 周小舟. IDEFO 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.
- [20] Liu, S., Dai, Y., Cai, Z., et al. (2021) Construction of Double-Precision Wisdom Teaching Framework Based on Blockchain Technology in Cloud Platform. *IEEE Access*, **9**, 11823-11834. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051468>