



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 基于解释Petri网的新型CPS分解方法

陈宇浩, 屠翰乾, 相东明

引用本文

陈宇浩, 屠翰乾, 相东明. 基于解释Petri网的新型CPS分解方法[J]. 计算机科学, 2025, 52(4): 49-53.

CHEN Yuhao, TU Hanqian, XIANG Dongming. [New Decomposition Method for Cyber-Physical Systems Based on Interpreted Petri Nets](#) [J]. Computer Science, 2025, 52(4): 49-53.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### [轻量级异构安全函数计算加速框架](#)

Lightweight Heterogeneous Secure Function Computing Acceleration Framework

计算机科学, 2025, 52(4): 301-309. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240600046>

### [面向低资源芯片的高效自适应卷积神经网络加速器](#)

Efficient Adaptive CNN Accelerator for Resource-limited Chips

计算机科学, 2025, 52(4): 94-100. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.241000099>

### [信息物理系统的传感器攻击抵御策略综述](#)

Survey of Sensor Attack Defense Strategies for Cyber Physical Systems

计算机科学, 2025, 52(4): 4-13. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.241000138>

### [SSPN-RA:基于SS-petri网的工业控制系统安全一体化风险评估方法](#)

SSPN-RA: Security Integration Risk Assessment Method for ICS Based on SS-petri Net

计算机科学, 2024, 51(10): 380-390. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.231000189>

### [基于随机Petri网的民机审定试飞实施流程建模与分析](#)

Modeling and Analysis of Implementation Process for Civil Aircraft Certification Test Flight Based on Stochastic Petri Net

计算机科学, 2024, 51(6A): 230700050-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230700050>

# 基于解释 Petri 网的新型 CPS 分解方法

陈宇浩 屠翰乾 相东明

浙江理工大学计算机科学与技术学院 杭州 310018

(1350100878@qq.com)

**摘要** Petri 网被广泛应用于信息物理系统(Cyber-Physical Systems,CPS)的建模与分析,这些系统通常包含多个并发任务。为了简化 CPS 的实现过程,可将其分解成为若干独立组件。现有的 CPS 分解方法,如基于整数线性代数的算法,面临高时间复杂度问题;而依赖监控器的分解方法则存在较大的通信开销。为解决这些问题,综合现有分解方法的优势,提出了一种基于解释 Petri 网的 CPS 分解方法。该方法通过约束条件逐步分解网络,生成独立的状态机组件,有效缩小了模型规模。同时,提出了一种新的信号同步机制替代传统的监控器方案,显著降低了同步开销。实验结果表明,所提方法在大多数测试案例中的分解时间为  $O(n^2)$ ,远优于传统方法的指数级复杂度  $O(2^n)$ ,且生成的组件集合也更加简洁。

**关键词**:信息物理系统;Petri 网;状态机组件;可编程门阵列;系统分解

**中图分类号** TP306

## New Decomposition Method for Cyber-Physical Systems Based on Interpreted Petri Nets

CHEN Yuhao, TU Hanqian and XIANG Dongming

School of Computer Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

**Abstract** Petri nets are widely used for the modeling and analysis of Cyber-Physical Systems(CPS), which typically involve multiple concurrent tasks. To simplify the implementation of CPS, these systems can be decomposed into several independent components. Existing CPS decomposition methods, such as algorithms based on integer linear algebra, suffer from high time complexity, while decomposition methods that rely on monitors incur significant communication overhead. To address these issues, this paper integrates the advantages of existing decomposition approaches and proposes a novel CPS decomposition method based on Interpreted Petri Nets(IPN). The proposed method incrementally decomposes the network using constraint conditions, generating independent State Machine Components(SMCs) to effectively reduce the model size. Additionally, a new signal synchronization mechanism is introduced to replace traditional monitor-based schemes, significantly reducing synchronization overhead. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves a decomposition time complexity of  $O(n^2)$  in most test cases, which is far superior to the exponential complexity  $O(2^n)$  of traditional methods. Furthermore, the generated component set is more compact and efficient.

**Keywords** Cyber-physical systems, Petri nets, State machine components, Field-programmable gate array, System decomposition

## 1 引言

信息物理系统(CPS)是一种集成计算、通信和控制功能于一体的系统架构,这种系统在智能家居、智能电网、多机器人系统等多个领域中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。为了支持这些应用,CPS 通常依赖于微处理器或专用硬件设备,如专用集成电路(ASIC)和现场可编程门阵列(FPGA),以实现高效的数据处理与实时控制。为了提升不同应用场景下的 CPS 设计与验证效率, Petri 网作为一种强大的形式化建模工具,因具有直观的控制流表示与精确的并发行为描述能力,已经成为

CPS 建模和分析的重要手段<sup>[2]</sup>。然而随着 CPS 系统愈发复杂,尤其是在并发组件数量增多的情况下,CPS 在安全性、性能与可靠性方面面临着严峻挑战<sup>[3]</sup>。例如,在安全攸关的智能电网 CPS 系统中,若无法有效管理并发组件的协调与信息流动,可能导致电网控制滞后,功率波动加剧,进而影响系统稳定性与能源效率<sup>[4]</sup>。

为了应对以上挑战,文献[5]提出了一种 CPS 分解策略。该策略将系统分解为可独立操作的组件,并使这些分散的组件各自构建成独立的系统,从而降低整体系统的复杂度。在利用 Petri 网对 CPS 系统进行分解时,这些分解后的组件被

到稿日期:2024-10-21 返修日期:2025-02-24

基金项目:国家自然科学基金(62002328);浙江理工大学科研业务费专项资金(24232123-Y)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62002328) and Fundamental Research Funds of Zhejiang Sci-Tech University(24232123-Y).

通信作者:相东明(dmxiang@zstu.edu.cn)

称为状态机组件(State Machine Component, SMC)。尽管对于简单的网模型,分解过程可以手动完成,但在面对具有大量并发行为的复杂系统时,分解过程的复杂度可能会呈指数级增长。这不仅极大地增加了设计和验证的难度,还可能导致计算资源的大量消耗<sup>[6]</sup>。此外,Acharya 等<sup>[7]</sup>指出,CPS 组件之间的交互性至关重要,这一特性在分解后组件的实时协同过程中尤为关键。因此,亟需开发更加高效且具有可扩展性的分解算法,以更有效地管理这些复杂系统,并确保各组件之间的高效协同交互。

目前最常用的系统分解方法是 Matinez-Silva 算法<sup>[8]</sup>。该方法基于整数线性代数,通过计算库所不变量来获得 SMC 分量。Wićniewski 等<sup>[9]</sup>对 Matinez-Silva 方法进行了优化,其判断所得 SMC 分量是否能够覆盖所有库所,若能满足覆盖条件则提前结束算法,减少了无效计算时间。尽管如此,该方法的时间复杂度仍为指数级别,且需要手动挑选合适的不变量组合。Ye 等<sup>[10]</sup>基于库所影响水平(Place Impact Level, PIL),提出了一种新的分解方法。该方法能够将 Petri 网分解为仅包含几个状态机的分散系统,并论证了全局系统与其分散系统在状态和行为上等价的条件。尽管该方法的时间复杂度是  $O(n^2)$ ,但是分解后的组件可能并不连通,且它需要增加监督控制器来维持分散系统的同步。这显著增加了模型的通信开销和复杂度。

现代 CPS 优化方法通常结合多种策略,以充分发挥不同方法的互补优势。例如,Sui 等<sup>[11]</sup>基于降阶技术与分解相结合的模型简化策略,有效提升了 CPS 的计算效率。为了解决上述问题,本文在计算库所不变量之前先使用 PIL 方法进行分解,以缩小后续的计算规模。但这也带来了一个新问题:如何解决前者带来的额外同步开销问题和连通性隐患?为此,在解释 Petri 网(Interpreted Petri Net, IPN)的基础上,引入了同步信号代替监督控制器。此外,考虑到分解可能破坏模型的连通性,适当修改了约束判断条件,并设计了一个约简过程<sup>[12]</sup>,暂时保留一些可能会导致连通性问题的目标库所,并推迟至后续分解阶段进行处理。最后,为了评估该策略的有效性,将分解后的结果应用于 FPGA 平台进行实验比较与测试,因为 FPGA 本质上支持高度并行性<sup>[13]</sup>,实验能够有效模拟分解后组件的并行行为。

## 2 解释 Petri 网

**定义 1** 解释 Petri 网是一个六元组  $IPN=(P, T, F, M_0, X, Y)$ <sup>[14]</sup>,其中:

- (1)  $(P, T, F, M_0)$  是一个 Petri 网<sup>[15]</sup>;
- (2)  $X$  是一个与变迁相关的有限输入信号集合,  $Y$  是一个与库所相关的有限输出信号集合;
- (3) 变迁  $t \in T$  在其使能且所有输入信号条件都满足时才能被触发;
- (4) 一个 IPN 要求满足安全性与活性<sup>[16]</sup>。其中,安全性意味着每个库所  $p$  的标记数目在整个运行过程中不会超过 1 个。活性表明,系统中的每个变迁在某个状态下都能够被触发,从而确保系统不存在死锁状态。

解释 Petri 网通过其结构和规则将 Petri 网模型与具体的

CPS 系统行为紧密联系起来,每个状态的变化和变迁的触发条件都可以通过模型中的定义和信号条件进行解释<sup>[14]</sup>。

**定义 2** 解释 Petri 网的一个节点  $x \in P \cup T$ ,其前集  $\cdot x$  被定义为  $\{y \mid (y, x) \in F\}$ ;其后集  $x \cdot$  被定义为  $\{y \mid (x, y) \in F\}$ 。

**定义 3** 状态机组件(SMC)<sup>[14]</sup>是 1 个 Petri 网的强连通子网,要求满足状态机条件,即:每个变迁最多只有 1 个输入库所和 1 个输出库所。SMC 的初始标记仅包含 1 个令牌。

**定义 4**(Petri 网约简) 一个 Petri 网  $PN=(P, T, F, M_0)$ ,对于任意  $t \in T$ ,如果  $|\cdot t|=1$  并且  $|t \cdot|=1$ ,那么该变迁  $t$  和它的库所被替换为一个新的宏库所  $mp$ <sup>[17]</sup>。约简后,得到新 Petri 网  $PN'=(P', T', F', M_0')$ ,如图 1 所示。Petri 网约简可以消除模型中被建模为序列的库所,并且保留系统原来的属性(如安全性、有界性、活性等)。

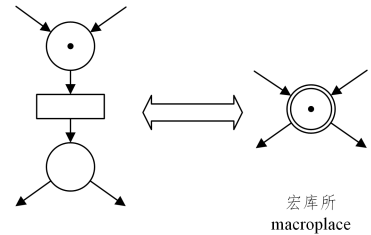


图 1 Petri 网的约简

Fig. 1 Reduction of a Petri net

**定义 5**(库所不变量<sup>[18]</sup>) 库所不变量  $\vec{x} \geq 0$  是 Petri 网  $PN=(P, T, F, M_0)$  的一个整数向量:

$$A\vec{x} = 0 \quad (1)$$

其中,  $A$  是  $PN$  的关联矩阵。

**定义 6** 库所影响水平(PIL)<sup>[10]</sup>是一个参数,用于衡量库所  $p$  的前集和后集中因  $p$  的参与而破坏状态机条件的变迁数量,用  $\lambda(p)$  表示。例如,  $p_3$  是图 2 中的一个库所,  $\cdot p_3 = \{t_1\}$  且  $p_3 \cdot = \{t_2\}$ 。  $t_1$  只有一个输出库所  $p_3$ ,因此  $t_1$  满足状态机条件,而  $t_2$  因有两个输入库所  $\{p_2, p_3\}$ ,故不满足状态机条件。在  $\cdot p_3 \cup p_3 \cdot$  中,只有一个变迁破坏了状态机条件,因此  $\lambda(p_3) = 1$ 。

## 3 CPS 分解的同步和优化方法

为了维持 CPS 分解过程中组件之间的同步关系,基于解释 Petri 网的信号机制,引入了额外的同步信号  $Z$  来替代传统使用外部监控器的同步方案。如果作用于库所上,则  $Z$  作为标记变化的输出信号,指示当前库所状态的完成;如果作用于变迁上,则  $Z$  作为输入信号,判断是否满足变迁的同步触发条件。基于该同步方法,分解后组件中变迁  $t$  的信号触发机制要求满足:

$$\left( \bigwedge_{z_i \in Z_i} (z_i = 1) \right) \wedge \left( \bigwedge_{x_j \in X_j} (x_j = 1) \right)$$

其中,  $X_i$  为与变迁  $t$  相关的输入信号集合。该变迁的触发要求相关同步信号和输入信号都处于使能状态。为了说明以上同步过程,图 2 展示了一个 CPS 的部分 Petri 网模型实例。该模型被分解为两个组件,其中变迁  $t_2$  是它们的共享变迁;额外的同步信号  $z_1$  和  $z_2$  分别插入到变迁  $t_2$  的输入库所中;同时  $z_1$  和  $z_2$  分别作为变迁  $t_2$  的守卫条件。

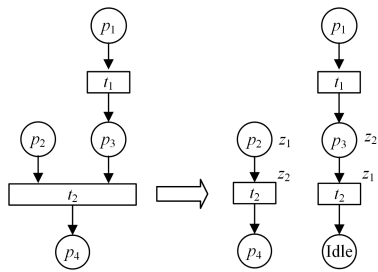


图2 分解模块之间的同步

Fig. 2 Synchronization between decomposed modules

传统 PIL 方法的约束条件判断在串联结构中,可能导致目标库所分离后,剩余网模型失去连通性。为了解决这一问题,对 PIL 方法进行了改进,优化了判断条件,如式(2)所示。

$$p(\lambda) = \begin{cases} 0, & \text{如果 } (\bigvee_{t \in \cdot p} |t \cdot| = 1) \vee (\bigvee_{t \in p \cdot} |t \cdot| = 1) \\ \sum_{t \in \cdot p} \mathbb{I}(|t \cdot| > 1) + \sum_{t \in p \cdot} \mathbb{I}(|t \cdot| > 1), & (2) \\ \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $\mathbb{I}$  为指示函数。如果一个库所的任意输入/输出变迁符合状态机条件,那么不管该库所是否破坏了其余变迁的状态机条件,它的 PIL 值都会被视为 0。通过保持串联结构的完整性,避免潜在孤立组件的出现。

根据以上分解步骤,本文提出了解释 Petri 网生成 SMC 的系统分解算法,如算法 1 所示。

**算法 1** 解释 Petri 网分解为 SMC 模型

输入: 一个解释 Petri 网  $IPN = (P, T, F, M_0, X, Y)$

输出: 状态机组件集合  $\mathbb{S}$

1. 约简 IPN 为  $IPN' = (P', T', F', M_0', X, Y)$ ;
2. for  $\forall p' \in P'$  do
3. 计算  $\lambda(p')$ , 找出  $\lambda(p')$  最大的库所为  $p_{max}$ ;
4. end for
5. while  $\lambda(p_{max}) > 0$  do
6. 创建 SMC:  $S = (P'', T'', F'', M''_0, X'', Y'')$ ;
7. 创建额外空库所  $p_{idle}$ ;
8. for  $\forall t' \in p_{max}$  do
9. 复制  $t'$  为  $t''$ ;
10.  $\cdot t'' = p_{idle}, t'' \cdot = p_{max}$ ;
11.  $T'' = T'' \cup \{t''\}$ ;
12. end for
13. for  $\forall t' \in p_{max} \cdot$  do
14. 复制  $t'$  为  $t''$ ;
15.  $t'' \cdot = p_{idle}, \cdot t'' = p_{max}$ ;
16.  $T'' = T'' \cup \{t''\}$ ;
17. end for
18. 从  $P'$  中移除  $p_{max}$ ;
19.  $P'' = P'' \cup \{p_{idle}\} \cup \{p_{max}\}$ ;
20. if  $P''$  中所有库所都不含初始标记 then
21. 为  $p_{idle}$  添加一个初始标记;
22. end if
23.  $\mathbb{S} = \mathbb{S} \cup S$ ;
24. 约简产生新的  $IPN'$ ;
25. 更新所有的  $\lambda(p')$  和  $p_{max}$ ;
26. end while

在算法 1 中,每次分解前都会对网模型进行约简,并根据

约束条件评估分解是否具备进一步实施的条件。每个分解的目标库所都会独立形成一个状态机组件,并被额外添加一个同步库所  $p_{idle}$ 。该库所可被视为一个等待状态,在实际运行时并不会产生任何行为。在每轮删除具有最大  $\lambda$  的库所后,算法需要重新计算所有剩余库所的  $\lambda$  值。假设原始 IPN 中库所的数量为  $n$ ,则算法 1 的总体时间复杂度为:

$$O\left(\sum_{i=1}^n i * (n-i+1)\right) = O(n^2)$$

针对大多数 CPS,算法 1 能够有效生成所有状态机组件。

如果在算法 1 结束后,剩余的网模型中仍存在不满足状态机条件的变迁,再采用 Matinez-Silva 算法求解库所不变量,从而提取出剩余的状态机组件。由于算法 1 已经显著简化了网模型的结构,因此,后续不变量的计算规模大大缩小。只有当原始网络模型不满足任何可应用的约简或约束优化条件时,后续的分解时间复杂度才会达到指数级  $O(2^n)$ 。

需要注意的是,在更新所有库所 PIL 值时,具有最大 PIL 值的库所不一定只有 1 个。然而,无论选择哪个具有最大 PIL 值的库所进行分离,都会产生符合要求的状态机组件集合。尽管不同的分解顺序可能会导致不同的组件集合,但这些结果都符合系统设计的要求。

## 4 案例分析

为了说明上述方法的实际应用情况,选取了一个真实的信息物理系统作为案例分析。该系统是一个汽车进入车库的智能家居系统,最初在文献[19]中被提出。该系统的解释 Petri 网模型如图 3(a)所示。

在该系统模型中,大门和车库起始都处于关闭状态( $y_1$ )。当传感器检测到汽车到达门口( $x_1$ )时,左右两扇大门被打开( $y_2, y_3$ ),直到到达适当的传感器位置( $x_2, x_3$ )。同时,光照传感器会检测此时是否有阳光,如果没有阳光(! $x_4$ ),那么路灯会被打开( $y_4$ )。当车库前的传感器检测到汽车已经驶到车库门口( $x_5$ )时,车库的大门会被打开( $y_5$ )。如果路灯在之前被打开,那么此时将会关闭。直到传感器检测到汽车完全驶入车库后( $x_6$ ),车库和大门被关闭,系统回到最初状态并等待下一辆汽车驶入。该解释 Petri 网由 9 个库所和 8 个变迁组成,其中只有库所  $p_1$  含有一个初始标记。该模型已被验证满足活性与安全性。

针对以上解释 Petri 网模型,现使用本文提出的方将其分解为状态机组件。首先,系统模型会被约简并产生一个新的解释 Petri 网。在这个过程中,因为变迁  $t_2, t_3, t_4, t_5$  和  $t_7$  符合状态机的定义,因此变迁  $t_2$  和它的库所  $p_2, p_3$  被替换为一个宏库所  $m p_1$ 。其他待替换的变迁和相关库所同理,总共可产生 3 个宏库所,即  $m p_1, m p_2$  和  $m p_3$ 。其次,计算得到它们的 PIL 值皆为 2(其他库所 PIL 值都为 0)。因此,选择将  $m p_1$  (也可选择  $m p_2$  或  $m p_3$ ) 从系统中分解,该过程产生了一个状态机组件  $S_1$ 。随后,系统模型会再次被约简,以产生一个新的解释 Petri 网,变迁  $t_6$  符合状态机定义( $p_5$  在之前已被移除), $t_6$  和它的库所  $p_8$  和  $m p_2$  (由  $t_3, p_3$  和  $p_6$  组成) 被替换。再次计算所有剩余库所 PIL 值,并分解得到一个新的状态机组件。最终,系统分解得到一个状态机组件集合  $\mathbb{S} = (S_1, S_2, S_3)$ , 其中  $S_i = (P_i, t, F_i, M_i, X_i, Y_i), i = 1, 2, 3$ 。

分解的结果如图 3(b)–图 3(d)所示,每个状态机组件分别包含如下库所:

- 1)  $P_1 = (Idle_1, p_2, p_5)$
- 2)  $P_2 = (Idle_2, p_3, p_6, p_8)$
- 3)  $P_3 = (p_1, p_4, p_7, p_9)$

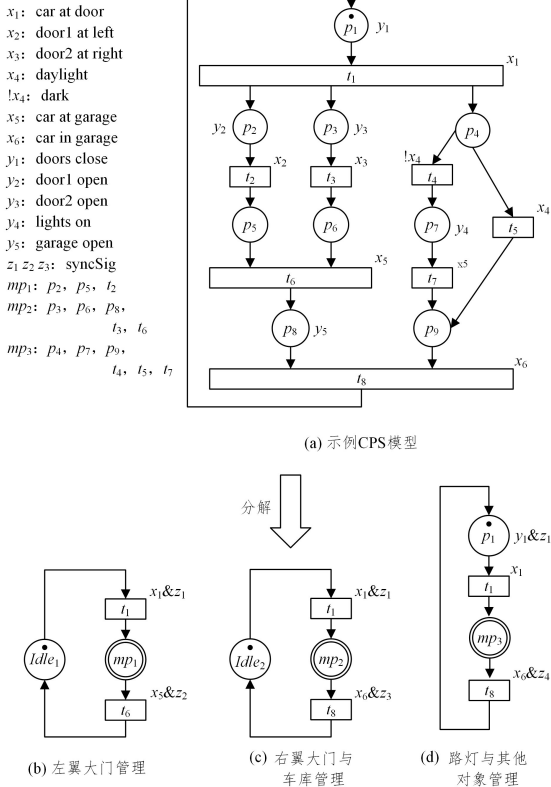


图 3 示例模型及分解结果

Fig. 3 Example model and decomposition results

原型系统的部分功能如不同大门和路灯的控制被分散至不同的组件中管理,并通过数个额外的同步信号  $z$  进行同步。所展示的智能家居系统已在 FPGA 设备(型号为 Xilinx ZYNQ-7 系列)中实现,系统的功能通过设备的输入和输出端口进行验证。其中,示例系统  $d$  组件的运行效果如图 4 所示,即在库所  $p_1$  接收到汽车到来信号  $x_1$  后,令牌从  $p_1$  处移除并添加到  $p_4$ ,由于此时没有光照,令牌又马上转移到  $p_7$  并打开路灯。在令牌从  $p_9$  重新回到  $p_1$  后,系统开始新一轮的循环。从运行结果可观察到该系统按照预期的流程工作。

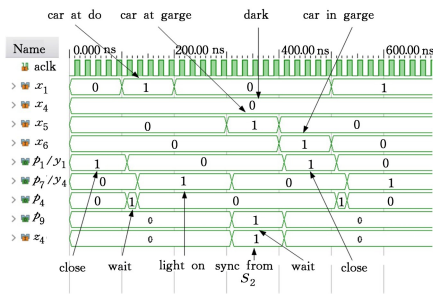


图 4 示例系统在 FPGA 上的实现结果

Fig. 4 Implementation results for the FPGA of the example system

## 5 实验分析

本文将所提出的分解方法与改进的基于库所不变量的分解方法<sup>[9,19]</sup>进行了实验对比,分析了分解时间及分解结果数量的差异。选择的测试数据集涵盖了多个格式良好的 Petri 网模型,代表了真实和假设的工程系统以及并行控制算法等典型 CPS 应用场景,具体来源于 HIPPO-CPS 数据集<sup>1)</sup>和 IOPT-Tools 数据集<sup>2)</sup>。这些实验在 Intel i7-12700H @ 2.7 GHz 处理器上进行。

### (1) 实验 1

在实验 1 中,选择了多个 Petri 网模型进行测试,这些模型的库所和变迁数量逐步增加,以评估所提方法在不同复杂度模型下的分解时间。需要注意的是,本文方法的总时间由算法 1 的执行时间和后续调用 Improved Invariants 的时间共同组成。

实验结果如表 1 所列。可以看出,本文提出的方法相比传统方法(Improved Invariants),不仅在时间效率上显著提升,生成的 SMC 数量也明显减少。大多数测试模型仅依靠算法 1 即可完成分解,无需进一步调用不变量计算方法。此外,对于 cn\_crr25 这样的复杂模型,单纯的不变量的计算难以在短时间内获得结果。而本文方法在分解过程中,通过算法 1 提前分解出了部分结果,缩小了后续不变量计算的规模,从而使计算能够在有限时间内完成。

表 1 不同模型实验的对比结果

PN	P	T	Our method		Improved Invariants	
			SMCs	Time/ms	SMCs	Time/ms
assistive leds	6	3	4	0.05+0	6	0.27
airplane	8	6	3	0.06+0	3	0.27
preparae	9	10	2	0.09+0	3	0.58
manu actuator	17	13	5	0.14+0	5	0.85
ingredients	20	15	7	0.21+0	16	2.67
smart home	23	40	9	0.76+0	12	840.64
kbatata23	32	23	10	0.23+0	10	3.18
ingredients	48	80	8	0.75+0	21	13.58
kbatata24	54	68	15	0.82+0	55	17.05
garage	56	82	9	1.45+0	51	228.79
abc_parque	200	51	176	4.79+452.11	—	>1000000

### (2) 实验 2

实验 2 以 mixer5 模型为起点,逐步增加其并发任务数量(从 5 增至 30),以评估本文方法在相同模型下不同并发规模的时间消耗,并与传统方法(Improved Invariants)进行对比,如图 5 所示。

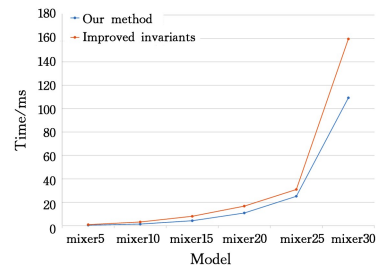


图 5 同模型扩展实验对比结果

Fig. 5 Comparison results of extended experiments on the same model

<sup>1)</sup> <http://www.hippo.iee.uz.zgora.pl>

<sup>2)</sup> <http://gres.uninova.pt>

实验结果表明,随着并发任务数量的增加,本文方法的时间消耗增长幅度显著小于传统方法。

**结束语** 本文将改进的 PIL 的快速分解策略应用于解释 Petri 网,弥补了传统 CPS 分解方法速度慢以及普通 Petri 网在分散控制中复杂度高的不足。此外,本文引入的约简技术进一步优化了解析过程,缩减了模型规模。实验结果验证了该方法的有效性,其表现出良好的时间效率,且生成的状态组件无需额外挑选过程即可直接应用于实际设备。

然而,本文方法所得到的解决方案不一定是最优的。尽管该限制不会影响到系统的行为分析,但在系统实现时可能会消耗更多的设备资源。因此,下一步研究将重点关注如何在分解生成状态机组件后,通过结构优化、状态合并等方法减少冗余,进一步精简状态机组件。

### 参 考 文 献

- [1] SARKAR B D,SHARDEO V,DWIVEDI A,et al. Digital transition from industry 4.0 to industry 5.0 in smart manufacturing: A framework for sustainable future[J]. *Technology in Society*, 2024,78:102649.
- [2] GIRAULT C,VALK R. Petri nets for systems engineering:a guide to modeling, verification, and applications [M]. Springer Science & Business Media,2013.
- [3] AWOTUNDE J B,OGUNS Y J,AMUDA K A,et al. Cyber-physical systems security: analysis, opportunities, challenges, and future prospects[J]. *Blockchain for Cybersecurity in Cyber-Physical Systems*,2023,102:21-46.
- [4] HARKAT H,CAMARINHA-MATOS L M,GOES J,et al. Cyber-physical systems security:A systematic review[J]. *Computers & Industrial Engineering*,2024,188:109891.
- [5] OKS S J,JALOWSKI M,LECHNER M,et al. Cyber-physical systems in the context of industry 4.0:A review,categorization and outlook[J]. *Information Systems Frontiers*,2024,26(5):1731-1772.
- [6] GROBELNA I,KARATKEVICH A. Challenges in application of Petri nets in manufacturing systems[J]. *Electronics*,2021,10(18):2305.
- [7] ACHARYA S,KHAN A A,PÄIVÄRINTA T. Interoperability levels and challenges of digital twins in cyber-physical systems [J]. *Journal of Industrial Information Integration*,2024,42:100714.
- [8] MARTÍNEZ J,SILVA M. A simple and fast algorithm to obtain all invariants of a generalised Petri net[C]// the First and the Second European Workshop on Application and Theory of Petri Nets. Berlin,Heidelberg:Springer Berlin Heidelberg,1982:301-310.
- [9] WIŚNIEWSKI R,KARATKEVICH A,WOJNAKOWSKI M. Decomposition of distributed edge systems based on the Petri nets and linear algebra technique[J]. *Journal of Systems Architecture*,2019,96:20-31.
- [10] YE J,ZHOU M C,LI Z,et al. Structural decomposition and decentralized control of Petri nets[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*,2017,48(8):1360-1369.
- [11] SUI Q K,WANG Y L,LIU C L,et al. Koopman-Constrained Hierarchical Deep State Space Model for Industrial Quality Prediction via Cloud-Edge Collaborative Framework [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*,2025,55(2):1137-1150.
- [12] WOJNAKOWSKI M,WIŚNIEWSKI R,BAZYDŁO G,et al. Analysis of Safeness in a Petri Net-Based Specification of the Control Part of Cyber-Physical Systems[J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*,2021,31(4):647-657.
- [13] CHENG Y. Research on FPGA Functional Reliability based on Petri Net[C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing,2023.
- [14] DAVID R,ALLA H. Discrete,continuous, and hybrid Petri nets [M]. Berlin:Springer,2005.
- [15] MURATA T. Petri nets:Properties,analysis and applications [C]// *Proceedings of the IEEE*. 1989:541-580.
- [16] LI C,LI Y,CHENY,et al. Synthesis of liveness-enforcing Petri net supervisors based on a think-globally-act-locally approach and a structurally minimal method for flexible manufacturing systems[J]. *Computing and Informatics*,2022,41(5):1310-1336.
- [17] BILINSKI K,ADAMSKI M,SAUL J M,et al. Petri-net-based algorithms for parallel-controller synthesis [J]. *IEEE Proceedings-Computers and Digital Techniques*,1994,141(6):405-412.
- [18] ZAITSEV D A. Decomposition-based calculation of Petri net invariants[C]// *The 25th International Conference on Application and Theory of Petri Nets*. Bologna,Italy,2004:79-83.
- [19] WISNIEWSKI R. Design of Petri net-based cyber-physical systems oriented on the implementation in field programmable gate arrays[J]. *Energies*,2021,14(21):7054.



**CHEN Yuhao**, born in 2000, postgraduate. His main research interest is design and verification of embedded systems.



**XIANG Dongming**, born in 1986, Ph.D, associate professor, is a member of CCF (No. F7232M). His main research interests include formal method, concurrent system analysis, and verification of intelligent manufacturing system.