

李鸿, 倪枫, 刘文诚, 等. 基于 TCPN 的软件项目动态进度管理方法[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(9): 1-6. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 250901

# 基于 TCPN 的软件项目动态进度管理方法

李 鸿<sup>1</sup>, 倪 枫<sup>1</sup>, 刘文诚<sup>2</sup>, 刘 姜<sup>1</sup>, 陈年年<sup>1</sup>, 周兴郡<sup>1</sup>

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘 要:** 针对实现软件项目的动态进度管理问题, 本研究通过具体分析以 Petri 网为基础的时延着色 Petri 网 (TCPN), 在库所与变迁关系、时间属性、状况空间信息三个方面对项目进度管理的映射关系进行深入研究。在此基础上, 提出了一套基于 TCPN 模型的动态管理方法, 并通过实例进行了可行性验证。研究结果表明: TCPN 能够成功实现对软件进度过程的仿真, 进而获取项目的最短完成工期, 使项目管理者能够主动响应环境变化, 实现动态进度管理的有效控制。

**关键词:** 进度管理; 动态管理; Petri 网; 仿真; 项目管理

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)09-0001-06

## Dynamic progress management method for software projects based on TCPN

LI Hong<sup>1</sup>, NI Feng<sup>1</sup>, LIU Wencheng<sup>2</sup>, LIU Jiang<sup>1</sup>, CHEN Niannian<sup>1</sup>, ZHOU Xingjun<sup>1</sup>

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

2 School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Addressing the dynamic progress management challenges in software projects, this study conducts a detailed analysis using the Timed Colored Petri Net (TCPN) based on the Petri net framework. The research delves into the mapping relationships of project progress management in terms of place and transition relationships, time attributes, and state space information. Building upon this analysis, a dynamic management approach based on the TCPN model is proposed and the feasibility is validated through practical examples. The research findings indicate that TCPN can successfully simulate the software progress process, thereby achieving the shortest project completion period and empowers project managers to proactively respond to environmental changes, facilitating effective control of dynamic progress management.

**Key words:** progress management; dynamic management; Petri nets; simulation; project management

## 0 引 言

动态进度管理是根据项目活动任务执行过程中的实际情况, 动态地调整活动执行进度, 以满足计划进度要求的管理工作<sup>[1]</sup>。软件开发项目因技术复杂性和需求变化频繁的特点, 在进行软件项目进度管理的过程中经常会出现项目活动任务变更等情况出现, 使得动态进度管理在软件项目进度管理工作开展中具有重要的实践价值。

目前国内外已有对于动态项目进度管理领域的相关研究, 其中以仿真的方式进行项目过程模拟是

动态项目进度管理的一个主流研究方向<sup>[2]</sup>, 在建筑行业常通过 BIM 的方式<sup>[3-4]</sup>进行项目过程可视化仿真实现动态进度管理, 但是仍未研发出针对软件行业的建模工具。同时, 如何通过及时响应项目条件变化进行进度工期预测<sup>[5-6]</sup>, 实现事中的主动进度管理也是动态进度管理的主要研究问题, 其中蒙特卡洛模拟<sup>[7-8]</sup>是比较常见的方式。TCPN 作为一种带有时间属性的 Petri 网模型<sup>[9]</sup>, 不仅能够以图形化的形式可视化项目过程, 且能够完成项目的工期预测工作, 适合用于进行动态项目进度管理研究。

本文基于此前对于时延着色 Petri 网 (TCPN) 的

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

**作者简介:** 李 鸿 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 信息系统项目管理, 进度管理; 刘文诚 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 系统建模与仿真, 大数据分析。

**通信作者:** 倪 枫 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 系统科学, 系统分析与集成。Email: nifeng@usst.edu.cn。

收稿日期: 2023-12-30

研究,分析 TCPN 进度模型到项目进度管理的映射关系,利用 TCPN 图形化建模的可读性以及可执行建模的实时仿真特点,设计一套直观且可用于实现软件开发项目的项目进度动态管理方法,以提高软件项目工作的进度管理效率。

## 1 TCPN 模型理论

### 1.1 时延着色 Petri 网理论

时延着色 Petri 网 (Timed Colored Petri Net, TCPN) 是在经典 Petri 网的基础上,结合了着色 Petri 网和时延 Petri 网的特点而成的高级 Petri 网<sup>[10]</sup>。TCPN 理论是在 Petri 网理论的基础上扩展而来,除了具有 Petri 网所具有的特点,还增加了时间的表达和颜色集的表达<sup>[11]</sup>,能对项目任务持续的时间进行描述,同时丰富了库所的描述范围。

TCPN 是一个十元组,  $TCPN = (P, T, F, W, R, C, D, E, M, I)$ , 其中  $P, T, F, W$  构成经典 Petri 网,  $P$  被称为库所集,  $P$  中的元素为库所,  $T$  被称为变迁集,  $T$  中的元素为变迁,  $F$  被称为流<sup>[12]</sup>;  $W$  为弧上的权函数;  $R$  是有限类型的颜色集合;  $C$  是颜色函数, 用于托肯库所中不同类型的托肯;  $D$  是时间延迟函数, 定义在变迁  $T$  上, 指示托肯在触发、并经历延迟时间后离开后续库所;  $E$  是弧表达函数, 规定托肯流动的规则;  $M$  是托肯函数, 表示库所的托肯数量;  $I$  是抑制弧的集合, 用于表示不同库所的触发优先度。

### 1.2 TCPN 进度模型

TCPN 进度模型是在之前研究基础上针对软件项目所构建的 TCPN 动态可执行网络图模型。Petri 网在加入了时间和着色库所后, 能对项目任务进行表达, 项目中的实际任务会以活动单元的形式映射到模型中, 每个活动单元由启动活动变迁、任务库所和结束活动变迁构成, 再由节点库所将所有的活动单元链接起来, 形成 TCPN 进度网络图模型。TCPN 进度模型活动单元如图 1 所示。

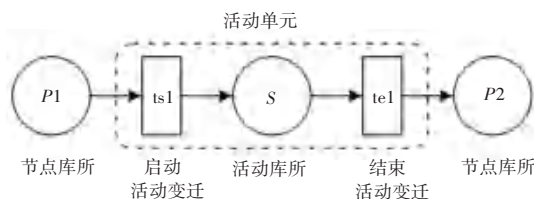


图 1 TCPN 进度模型活动单元

Fig. 1 Activity unit of TCPN progress model

TCPN 进度模型在保持静态网络图描述项目活动逻辑关系的功能基础上, 还能通过动态仿真的方式模拟项目的执行情况, 为实现动态进度管理提供

了基础。

## 2 TCPN 进度模型与进度管理的映射关系

TCPN 进度模型是以 Petri 网理论为基础构建的动态可执行模型, 通过活动单元映射活动进度执行, 是模型建模的关键; 将模型仿真的时间映射为项目进度时间关系是使用模型进行进度管理的核心, 而模型状态空间信息能对项目计划的正确性进行检验, 下文将对上述映射关系进行阐述。

### 2.1 TCPN 进度模型中库所与变迁到进度执行的映射关系

TCPN 中的变迁存在使能<sup>[13]</sup>和点火<sup>[14]</sup>两种状态, 使能是一个逻辑状态, 取决于与变迁相连的输入库所中是否有足够的标识, 并且与变迁相连的输出库所有足够的容量接收新的标识。如果变迁使能, 可以进行点火; 如果变迁不使能, 则无法进行点火, 即使时间过去或其他条件发生变化, 使能是点火的充分条件, 变迁的使能表示该变迁目前具备点火的条件。点火则表示发生了一次状态转换, 当一个变迁被点火时, 就会从输入库所中消耗一些托肯, 并将一些标识放入输出库所中, 从而改变了 TCPN 的状态。

TCPN 进度模型中活动单元的启动活动变迁使能, 映射到进度管理中代表活动准备就绪, 开展活动所具备的资源已到位且前置任务已经完成; 启动变迁点火, 托肯完成了从节点库所状态到活动库所状态的改变, 映射到进度管理中代表活动进行执行状态; 当活动库所存在托肯时, 结束活动变迁使能且被点火, 托肯从活动库所状态改变到节点库所状态, 映射到进度管理中代表活动处于完成状态。

### 2.2 TCPN 进度模型的时间属性与项目进度时间的映射关系

TCPN 进度模型的时间函数将时间的概念引入到模型中, 衍生了步数 (Step)、局部时钟 (Local Clock) 和全局时钟 (Global Clock) 的概念<sup>[15]</sup>, 其中步数表达了每个变迁点火的实际发生次数, 每次发生变迁点火, 系统的步数便会增加一个单位; 局部时钟和全局时钟即用函数表达模型仿真过程中的时刻和时间属性, 局部时钟和全局时钟对变迁的点火规则产生了影响。

引入时间函数后, 模型元素中的托肯会获得一个时间戳的属性, 变迁上的时间函数会给托肯的时间戳属性带来变化, 托肯的时间戳信息将被累加, 变化后的时间戳信息表达了该托肯目前所处于局部时钟状态, 局部时钟是独立的且能够同时存在复数个,

每个托肯都有着自己的局部时钟且一个 TCPN 系统中同时存在多个局部时钟。

全局时钟是整个系统中的单一时钟,对所有的变迁点火规则产生影响。全局时钟在系统中的数值会伴随着步数发生变化,在数值上与此时系统中触发变迁点火后的托肯上的局部时钟信息保持一致。

全局时钟的存在,进度模型中的变迁点火的发生不仅需要前集的库所中有库所,还需要满足库所中托肯时间戳中的局部时钟数值等于全局时钟数值的条件。TCPN 进度模型中的节点库所会记录 2 个全局时钟信息,分别是托肯触发变迁点火进入节点库所的全局时钟以及托肯触发变迁点火离开节点库所的全局时钟。

当库所记录的这 2 个全局时钟信息相同时,说明库所此时不处于并行状态或者处于并行状态中的所有托肯均可同时进行,不产生冲突或者等待情况;当这 2 个全局时钟信息不相同,说明库所处于并行状态,局部时钟数值大的托肯需要等待局部时钟数值小的托肯先触发变迁点火后,全局时钟更新到与自己的局部时钟数值相等时才能触发变迁点火。

节点库所记录的这 2 个全局时钟信息,前者映射到进度管理中即为任务的最早完成时间(EF),后者映射到进度管理中即为并行活动的最迟完成时间(FF),两者之差即为活动的浮动时间(TF),利用关键路径法可知浮动时间为 0 的任务为关键路径上的任务,由此得到 TCPN 进度模型的关键路径。

2.3 TCPN 进度模型的状态空间信息与进度计划的映射关系

TCPN 作为一种高级 Petri 网,借助 CPN Tools<sup>[16]</sup>工具能根据获得模型建模的有界性和活性分析等状态空间信息,用于评价模型的可达性和效率等情况<sup>[17]</sup>。

有界性分析中 Best Integer Bounds 给出了每个库所所拥有的托肯数量区间,同时 Best Upper/Lower Multi-set Bounds 还给出了每个库所中托肯的可能取值情况。当模型的有界性分析得到的结果中模型每一个库所所拥有的托肯数量取值至多为 1 且不为 0,映射到进度计划中表示计划中的每个任务都被执行,若出现取值为 0 的情况,则模型映射的计划中可能出现任务未被执行的情况。

活性分析确定了进度模型中的死标识状态(Dead Markings)、死的变迁(Dead Transition)和活的变迁(Live Transition)<sup>[18]</sup>。其中,Dead Markings 表示在该标识下任何赋值变迁均为非使能的,映射到进度计划中,表达了进度计划可能存在的调度计划;

Dead Transition 指模型的可达图中存在任何无法发生的变迁,Live Transition 是指可达图中存在任意序列都存在同一个变迁发生,这 2 个指标为无时,说明建模正确,映射到进度计划中说明计划是可被执行的。

3 动态项目进度管理方法过程

借助 TCPN 进度模型的动态可执行性,可实现软件项目的动态项目进度管理。项目经理使用 TCPN 进度模型进行动态进度管理的流程如图 2 所示,根据管理工作重心的不同,可将基于 TCPN 的动态进度管理工作分为 3 部分进行论述。

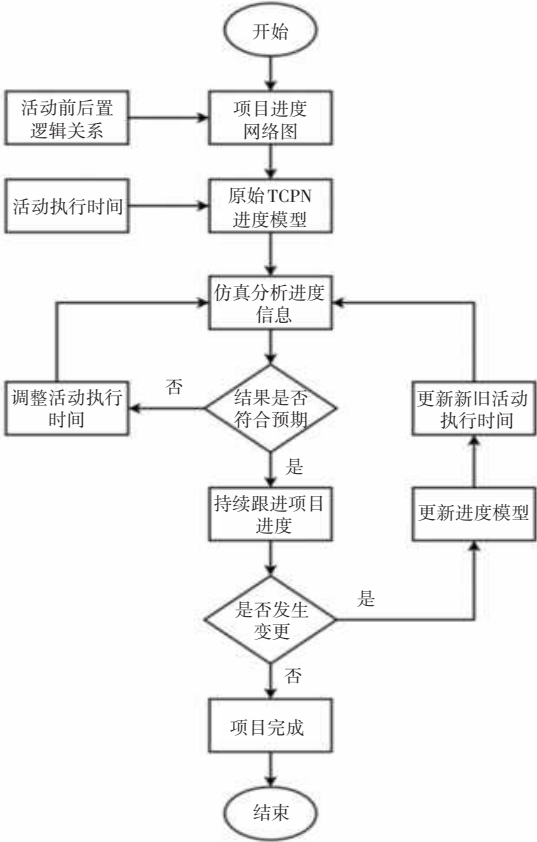


图 2 动态项目进度管理流程

Fig. 2 Dynamic project schedule management process

第一部分为 TCPN 进度模型建模。根据任务间的前后置逻辑关系,可构建出项目的进度网络图,然后以此网络图为基础,在 CPN Tools 中搭建 TCPN 进度模型,为每个活动单元添加代表任务执行时间的时延信息并验证模型有效性。

第二部分为仿真数据分析。项目经理在构建好 TCPN 进度模型后,即可通过执行模型,得到仿真输出的项目预期执行情况和工期结果,并将结果与原始计划进行对比,在项目开始前就对项目计划的任



务执行时间进行调整,确保项目完成时间限定在可控范围内。

第三部分为动态进度管理。在项目执行过程中,项目经理持续跟进项目进度情况,当发生变更时,根据项目的实际情况,更新进度模型中的活动单元数量和前后置关系,以及活动单元的工期信息,重新开展模型仿真工作和进度信息分析工作,对比模型变动后的工期结果与原始计划的偏离程度,确认是否在可控范围内,若变更超出预期,则确定项目新的调度计划,并用 TCPN 进度模型进行效果验证,最后采用符合预期的调度方案,实现项目动态进度管理。

以 TCPN 进度模型为基础的动态项目进度管理方法能以网络图的形式直观地表现项目的执行情况和预期执行结果,能减少项目经理和业务人员之间的沟通成本,提高团队协作效率。

4 仿真实验与分析

以某项目功能开发过程为例,项目进度网络图由 6 个任务构成,如图 3 所示。其中,每个任务的工期见表 1。

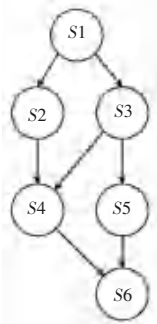


图 3 项目进度网络  
Fig. 3 Project progress net

表 1 任务工期信息  
Table 1 Task duration information

任务	时间/天	内容
S1	2	设计方案
S2	2	服务器
S3	4	客户端
S4	1	集成联调
S5	4	客户端
S6	2	集成测试

将上述信息作为输入,在 CPN Tools 中搭建 TCPN 进度模型,如图 4(a) 所示。模型中的代号信息见表 2,并对模型进行仿真。TCPN 进度模型变迁含义见表 3。

表 2 TCPN 进度模型库所含义  
Table 2 Meaning of place for TCPN model

序号	含义	序号	含义	序号	含义
P0	项目开始	P7	S3 活动完成	S1	S9 活动完成
P1	S1 活动完成	P8	S5 活动完成	S2	S10 活动就绪
P2	S2 活动就绪	P9	S6 活动完成	S3	S10 活动完成
P3	S2 活动完成	P10	S7 活动完成	S4	S11 活动就绪
P4	S4 活动就绪	P11	S8 活动就绪	S5	S11 活动完成
P5	S4 活动完成	P12	S8 活动完成	S6	S12 活动就绪
P6	S3 活动就绪	P13	S9 活动就绪	S7	S12 活动完成

表 3 TCPN 进度模型变迁含义  
Table 3 Meaning of transition for TCPN model

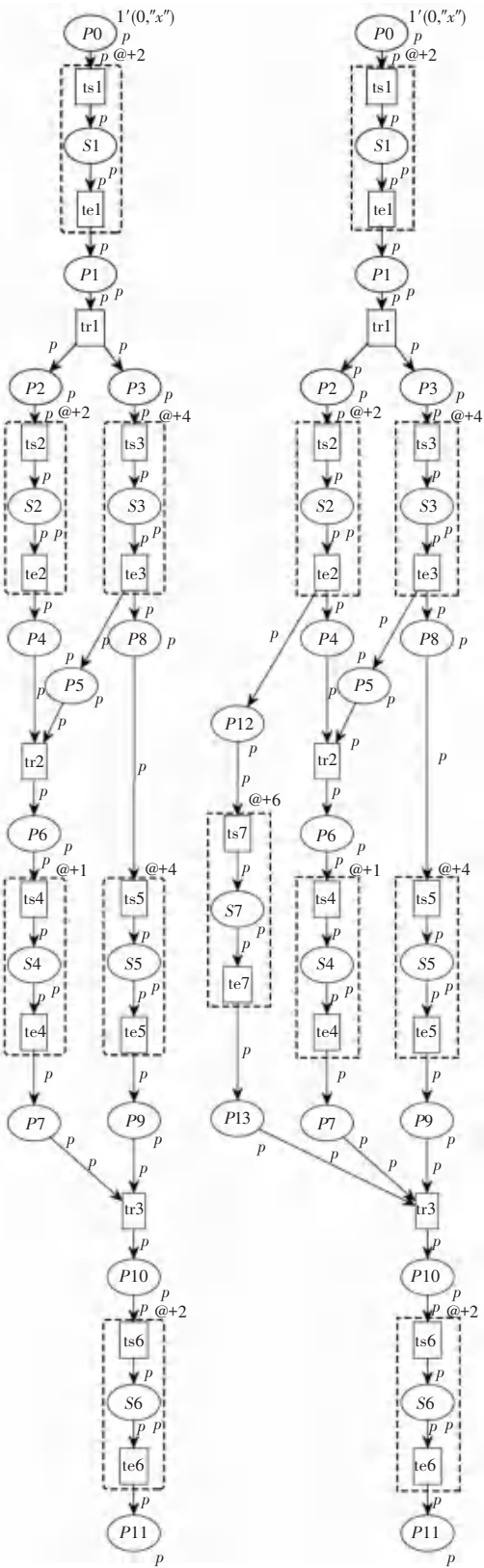
序号	含义	序号	含义	序号	含义
ts1	S1 活动开始	ts4	S4 活动开始	ts7	S7 活动开始
te1	S1 活动结束	te4	S4 活动结束	te7	S7 活动结束
ts2	S2 活动开始	ts5	S5 活动开始	tr1	过渡变迁
te2	S2 活动结束	te5	S5 活动结束	tr2	过渡变迁
ts3	S3 活动开始	ts6	S6 活动开始	tr3	过渡变迁
te3	S3 活动结束	te6	S6 活动结束		

模型仿真结果的状态空间信息显示,模型中所有库所的托肯上限为 1,下限为 0,表面模型是有界的,进度模型中所有的活动单元均被执行;Dead Markings 数为 2,Dead Transition 和 Live Transition 结果均为 None,说明模型搭建正确,模型具有可达性,项目计划可被执行。

模型仿真结束时的全局时钟信息为 12,即项目在第 12 天完成。此外,通过 CPN Tools 的监控功能,对每个活动单元后的节点库所进行监控,可得到全局时钟信息等于局部时钟信息的活动单元为 S1、S3、S5、S6,即 S1 - S3 - S5 - S6 为项目的关键路径,且项目的最快完成时间为 12 天。用关键路径法对仿真结果进行验算,计算结果与仿真结果相同,均为 12 天。将计算结果与计划进行对比,分析差异,根据差异结合实际情况重新调整模型中的任务工期,实现事前进度管理。

假设项目在执行过程中发生变更,项目计划新增一项任务,在原模型的基础上增加了任务 S7 的服务器工作,任务工期为 6,更新后的 TCPN 进度模型如图 4(b) 所示。对更新后的模型进行仿真,仿真结果得到项目的最快完成时间仍为 12 天,但是全局时钟信息等于局部时钟信息的活动单元新增加了 S7,即新增的任务 S7 并不会影响到项目的最快完成时间,但是会成为项目的关键路径,仍需要对其进度执

行情况进行重点关注,实现事中进度管理。



(a) 原模型 (b) 更新后

图 4 TCPN 进度模型

Fig. 4 TCPN process model

项目完成后,将项目的实际完成时间与 TCPN 进度模型的仿真结果进行差异分析,复盘总结偏差产生原因,实现事后进度管理,至此完成整个动态项目进度管理过程。

仿真实验结果表明,以 TCPN 为基础的进度模型能够现实动态项目进度管理。传统的网络图技术是静态的计划方法,只能在项目计划初期对项目的预计进度情况进行预测,当项目执行过程中的任务逻辑发现变化或者任务完成时间产生变化时,传统的网络图计划需要更新网络图再重新计算关键路径,在错综复杂的软件开发项目中,这项工作效率十分低下,而 TCPN 能够在图形化表达的基础上,只通过更新网络图的方式就能完成项目进度情况的更新,仿真获得变化后的工期预测情况以及关键路径信息,在大型、复杂以及迭代频繁的软件开发项目中能够有效提高项目进度管理的效率。

5 结束语

软件项目的动态进度管理在软件开发项目中是适应复杂环境变化、提高开发效率的重要手段。TCPN 基于高级 Petri 网的性质,能够将仿真过程有效映射为项目进度管理过程,从而对项目的最短完成时间进行有效预测。该模型在模型仿真层面实现了软件项目的动态进度管理,具有一定的可行性。以 TCPN 进度模型为核心的动态进度管理方法不仅能够实现动态进度管理,为工程实现动态管理提供了新的基础,同时以图形化建模方式直观地呈现项目进度过程,提高了项目管理者进行动态进度管理的效率,具备较高的工程应用价值,与传统的网络图计划技术相比具有更强的计划灵活性,能根据实际进展情况做出计划应变,更加适合软件开发项目。

参考文献

[1] PATRÍCIO V, LOPES D C R, PEREIRA L, et al. Project management in the development of dynamic capabilities for an open innovation era [J]. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2021, 7(3): 164.

[2] ČIRJEVSKIS A. Exploring the link of real options theory with dynamic capabilities framework in open innovation-type merger and acquisition deals [J]. Journal of Risk and Financial Management, 2021, 14(4): 168.

[3] 李枝军, 张金康, 韩晓楠, 等. 基于 BIM 技术的全预制混凝土梁桥施工进度动态预测及应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 351-357.

[4] 陈英杰, 王俊平, 魏敬徽, 等. 基于 BIM 的建筑工程进度编制及优化研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(13): 67-72.

[5] 丁瑶, 张喆, 安亚强. 基于 LSM-GM 预测的高速公路工程施工

进度动态控制[J]. 科技和产业,2022,22(7):364-369.

[6] GONDIA A, EZZELDIN M, EL-DAKHAKHNI W. Dynamic networks for resilience - driven management of infrastructure projects[J]. Automation in Construction, 2022, 136: 104149.

[7] KAMMOUH O, NOGAL M, BINNEKAMP R, et al. Dynamic control for construction project scheduling on - the - run [J]. Automation in Construction, 2022, 141: 104450.

[8] YUAN Shuaiqi, RENIERS G, YANG Ming. Dynamic - risk - informed safety barrier management: An application to cost - effective barrier optimization based on data from multiple sources [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 83: 105034.

[9] DRAKAKI M, TZIONAS P. A colored petri net-based modeling method for supply chain inventory management[J]. Simulation, 2022, 98(3): 257-271.

[10] BEVILACQUA M, CIARAPICA F E, GIOVANNI M. Timed coloured petri nets for modelling and managing processes and projects[J]. Procedia CIRP, 2018, 67: 58-62.

[11] 黄凤兰,倪枫,刘姜,等. 基于 ROAD-CPN 业务架构的可执行建模方法[J]. 上海理工大学学报,2023,45(5):534-542.

[12] 胡阳,余翔湛,李凯. 即时通讯流量检测与分析[J]. 智能计算机与应用,2019,9(1):178-182.

[13] 吴博,刘春明,辛文凯,等. 基于时间 Petri 网的配电自动化投资策略[J]. 电力建设,2023,44(5):141-148.

[14] 付仙兰,陈海山,李发均,等. 基于改进 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 空军预警学院学报,2021,35(4):269-272.

[15] 周剑峰,李子成. 基于着色时间 Petri 网的工业火灾应急响应行动建模与性能分析[J]. 安全与环境学报,2019,19(2):562-568.

[16] 钟贤欣,倪枫,刘姜,等. 基于 ROADS 的面向场景业务架构建模方法[J]. 上海理工大学学报,2023,45(4):415-424.

[17] 王新康,倪枫,刘姜,等. 基于扩展 BPMN 的“家园互动”式儿童健康管理系统架构[J]. 智能计算机与应用,2022,12(10):189-199.

[18] 梁伟婷,杨高升. 基于着色 Petri 网的地铁系统运营期应急管理流程建模与分析[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(5):179-185.