

约束条件下项目进度关键路径的 Petri 网建模方法

李 鸿¹, 倪 枫¹, 刘文诚², 刘 姜¹, 陈年年¹, 周兴郡¹

(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)

✉ lih3212@163.com; nifeng@usst.edu.cn; 233401960@st.usst.edu.cn;

jliu113@126.com; 15902602880@163.com; zhouxinjun0617@163.com



摘要:针对软件开发项目因存在约束条件而不能有效使用关键路径法的问题,利用 Petri 网并行性和异步性的动态特性,设计时延着色 Petri 网(TCPN)进度模型,通过将双代号网络图映射成 Petri 网,构建约束条件下的项目执行模型,用模型仿真得到约束条件下项目运行可能出现的情况,再运用关键路径法进行分析。案例结果表明:TCPN 进度模型可使用关键路径法预测软件开发项目的完工时间,获得项目关键路径信息和其他潜在的关键路径发生概率,并且完工时间预测准确率为 92.41%,具有一定的实用价值。

关键词:Petri 网;项目管理;资源约束;关键路径;进度管理

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A

A Petri Net Modeling Method for the Critical Path of Project Schedule under Constraints

LI Hong¹, NI Feng¹, LIU Wencheng², LIU Jiang¹, CHEN Niannian¹, ZHOU Xingjun¹

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

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

✉ lih3212@163.com; nifeng@usst.edu.cn; 233401960@st.usst.edu.cn;

jliu113@126.com; 15902602880@163.com; zhouxinjun0617@163.com

Abstract: Aiming at the problem that the critical path method cannot be used effectively in software development projects due to the existence of constraints, this paper proposes to use the dynamic characteristics of parallelism and asynchrony of Petri nets to design a Timed Colored Petri Net (TCPN) schedule model. A project execution model under constraints is constructed by mapping AOA (Arrow Diagramming Method) into Petri nets, and possible situations of project operation under constraints are obtained by model simulation, and then analyzed by the critical path method. The case results show that the TCPN schedule model can predict the completion time of software development projects with the critical path method and obtain the project critical path information and other potential critical path occurrence probability. The completion time prediction accuracy reaches 92.41%, which verifies that the proposed method is of some practical value.

Key words: Petri net; project management; resource constraints; critical path; schedule management

0 引言 (Introduction)

关键路径法(CPM)和计划评审技术(PERT)^[1]虽然能在

不考虑约束的唯一项目场景下有效表达活动自身的时间因素以及不同活动之间的逻辑关系,进而确定项目关键路径的完成

时间,但是在实际的软件开发过程中,由于存在资源限制和活动优先级等^[2]情况,项目场景不唯一,使用上述方法得到的结果不准确,因此考虑通过设计仿真模型,根据模型仿真可能出现的项目场景,再基于关键路径法进行求解分析,从而提高完成时间预测的准确性。

Petri 网^[3]是一种动态可执行系统模型^[4],适合用于研究并行开发的系统问题,而项目管理的活动具有并行性和异步性的离散性特点,因此适合用 Petri 网研究项目进度模型。李海凌等^[5]用分层赋时着色 Petri 网(HTCPN)模拟资源约束下的项目实施阶段的工作流情况,但只考虑了资源约束对项目的影
响,不完全适合软件开发项目;韩耀军^[6]利用 Petri 网求解项目关键路径,但是没有考虑约束条件下的情况。

基于时延着色 Petri 网(TCPN)的进度模型^[7]针对软件开发的特点,利用 Petri 网构建项目的约束条件,模拟软件开发项目的执行过程,在多次仿真结果中运用关键路径法,得出约束条件下的软件项目工期预测和关键路径信息。基于 TCPN 的进度模型不仅能将关键路径法运用在约束条件下的软件项目中,而且具有较强的工期预期能力,并能提供更加全面的进度管理信息。

1 TCPN 进度模型的构建 (Construction of TCPN progress model)

1.1 Petri 网及其扩展

Petri 网是一种用网状图形表示的系统模型。原型 Petri 网将一个网定义为三元组 $N=(P, T, F)$, 其中 P 为库所的有限集合,在网中用小圆圈表示; T 为变迁的有限集合,在网中用小矩形表示; $P \cup T = \emptyset, P \cap T = \emptyset; F \subset (P \times T) \cup (T \times P) \cap T$ 为有向弧的有限集合,在网中用方向箭头表示,存在于小圆圈和小矩形之间。

在原型 Petri 网的基础上增加弧的权函数 $W: F \rightarrow \mathbb{N}^+$ 和初始标识 $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}$, 则形成一个五元组 $\sum (P, T, F, W, M_0)$ 的经典 Petri 网。经典 Petri 网具有良好的扩展性,在此基础上扩展了着色 Petri 网(Colored Petri Net, CPN)^[8]和时延 Petri 网(Timed Petri Net, TPN)^[9]等高级 Petri 网,增强了 Petri 网的系统表达能力。

1.2 时延着色 Petri 网

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 网的特点的高级 Petri 网。

定义 1: 时延着色 Petri 网 TCPN 是一个十元组, $TCPN = (P, T, F, W, R, C, D, E, M, I)$ 。其中, (P, T, F, W) 为一个原型 Petri 网。

R 是非空的有限类型的颜色集合 (colored sets), 定义了不同类型的库所;

C 是映射到 R 的颜色函数 (color function), 可对库所中的标识进行标记, 以表示不同类型;

D 是时间延迟函数, 定义在变迁 T 上, 标识在变迁 T 触发函数后, 进入后续库所, 必须经历延迟时间 D 后, 才会离开后续库所;

E 是弧表达函数, 定义在弧 F 上, 表示标识流动的规则; M 是标识函数, 定义在库所 P 上, 表示库所的标识数量; I 是抑制弧的集合, 表示不同库所的触发优先度。

定义 2: 设 $x \in P \cup T$ 是网 TCPN 的任一元素, x 的前集与后集分别记为 $\cdot x$ 与 $x \cdot$, 则有

$$\cdot x = \{y | (y \in P \cup T) \cap (y, x) \in F\} \quad (1)$$

$$x \cdot = \{z | (z \in P \cup T) \cap (x, z) \in F\} \quad (2)$$

定义 3: TCPN 具有以下变迁引发规则。

$t \in T$, 若 $\forall p \in \cdot x: M(p) \geq 1$, 则变迁 t 在标识 M 下使能, 记作 $M[t >]$ 。

若 $M[t >]$, 则在标识 M 下 t 能够触发, 并且触发后产生新标识 M' , 记作 $M[t > M']$, 其中^[10]

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1, & p \in x \cdot - \cdot x \\ M(p) - 1, & p \in \cdot x - x \cdot \\ M(p), & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 双代号网络图向基于 TCPN 的进度模型的映射

1.3.1 活动网络映射

双代号网络图是由代表节点的圆圈和代表活动的有向弧连接形成的逻辑关系图。

在基于 TCPN 的进度模型中定义节点库所 PN , 用于映射双代号网络图中的圆圈节点, 记 $PN = \{P_1, P_2, \dots, P_m\} (m > 0)$ 。

定义活动库所 PS 表示具体的活动本身, 记 $PS = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} (n > 0)$; 定义启动活动变迁 TS 带有时间延迟函数, 记 $TS = \{t_1s, t_2s, \dots, t_n s\} (n > 0)$; 定义结束活动变迁 TE , 记 $TE = \{t_1e, t_2e, \dots, t_n e\} (n > 0)$ 。将由活动库所 PS 、启动活动变迁 TS 和结束活动变迁 TE 组成的活动单元用于映射双代号网络图中代表活动的有向弧。

过渡变迁 Tr 用于连接节点库所, 记 $Tr = \{tr_1, tr_2, \dots, tr_n\} (n > 0)$ 。

用有向弧将节点库所 PN 、活动单元和过渡变迁 Tr 连接起来, 得到基于 TCPN 的进度模型的网络图。双代号网络图向基于 TCPN 的进度模型的映射关系如图 1 所示。

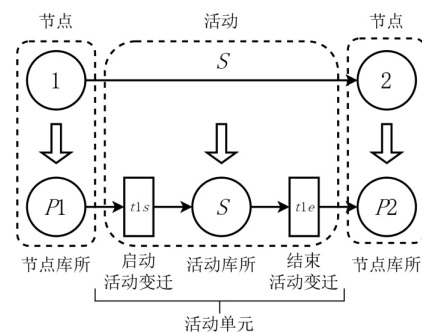


图 1 双代号网络图向基于 TCPN 的进度模型的映射关系
Fig. 1 Mapping relationships from AOA to TCPN-based schedule models

1.3.2 活动的持续时间映射

活动单元的持续时间由启动活动变迁上的时间延迟函数 D 决定。PERT 的活动持续时间是根据概率分布发生的, 是一种非固定持续时间, 通过将 D 定义为非固定持续时间函数, 可以将 PERT 的思想运用在基于 TCPN 的进度模型中。

基于 TCPN 的进度模型的持续时间确定方法借鉴了 PERT 的三点估算方法,定义了期望完成时间、乐观估计时间和悲观完成时间 3 种完成时间,活动单元的持续时间将在由以上 3 个时间点所构成的时间区间中随机取值,非固定时间延迟函数的分布函数 $u(x)$ 如下^[11]:

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-t}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & t > c \end{cases} \quad (4)$$

其中: a 是期望完成时间, b 是乐观估计时间, c 是悲观完成时间。

1.3.3 活动之间逻辑关系映射

双代号网络图中定义了 4 种活动之间的逻辑关系^[12],分别为完成-开始(FS)、开始-开始(SS)、完成-完成(FF)和开始-完成(SF),映射到基于 TCPN 的进度模型中的关系如图 2 所示。

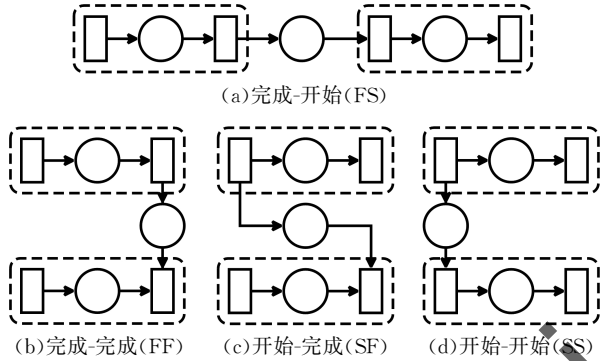


图 2 活动单元之间的逻辑关系映射到基于 TCPN 的进度模型中的关系

Fig. 2 Logical relationships between activity units mapped to relationships in TCPN-based schedule models

基于 TCPN 的进度模型通过将活动单元按逻辑关系连接起来形成进度网络模型。基于 TCPN 的进度模型中的各活动单元是经过 WBS(Work Breakdown Structure)分解后的最小工作单元。

2 基于 TCPN 的进度模型约束条件的构建 (Construction of constraint conditions for TCPN schedule model)

2.1 资源数量约束关系的构建

通过构建资源库所对资源数量约束关系进行构建。

定义资源库所 PR ,记 $PR = \{r_1, r_2, \dots, r_m\} (m > 0)$,资源库所 PR 中的初始标识数代表项目所有可分配的人力资源,一类资源库所代表一类资源。从资源库所出来的有向弧连接到相应的启动活动变迁上,对于变迁 $t \in TS, \forall PN \in \cdot x: M(p) \geq 1$ 和 $\forall PR \in x: M(r) \geq 1$ 时,启动活动变迁使能。启动活动变迁触发后产生新标识进入活动库所,表示任务处于执行状态。活动库所中的标识经过函数 D 的滞留时间后,触发结束活动变迁,产生保留时间信息的人力资源标识和进度标识的 2 种标识,其中人力资源标识会回到资源库所,表示资源重新进入待

机状态。进度标识会进入后集的节点库所,表示活动单元已完成。资源数量约束关系的构建规则如图 3 所示。

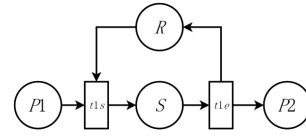


图 3 资源数量约束关系的构建规则 Fig. 3 Construction rules for quantitative resource constraint relationships

2.2 活动优先级约束关系的构建

在存在资源约束的情况下,优先级约束会改变活动的执行顺序,从而进一步影响关键路径的确定。通过约束弧映射活动优先级约束关系。

约束弧在图形上使用带有空心圆环的无向弧表示。约束弧空心圆环的一端连接启动活动变迁,另一端连接节点库所^[13]。只有当约束弧所连接的库所为空时,即 $\forall PN \in \cdot x: M(p) \in I \rightarrow M(p) = 0$,空心圆环所连接的变迁才会被触发。启动活动变迁上所连接的约束弧数量即代表活动的优先级关系,启动活动变迁上的约束弧数量越少,活动优先级越高。图 4 表示的优先级关系为活动 $S1 >$ 活动 $S2 >$ 活动 $S3$ 。

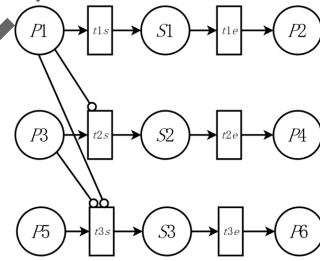


图 4 活动优先级约束关系

Fig. 4 Activity priority constraint relationships

3 基于 TCPN 的进度模型关键路径信息的确定 (Critical path information determination for TCPN-based schedule models)

3.1 固定持续时间的关键路径信息

CPN Tools 是一套针对着色 Petri 网的编辑、仿真和分析工具^[14-15],在支持 CPN 图形化建模的同时,还可以作为模型仿真和监控等分析工具使用^[16]。通过 CPN Tools 中 Monitoring 功能模块的 Mark Size 组件,监控活动单元获得的日志信息。Mark Size 日志信息中 time 列对应的项目进度信息如表 1 所示。

表 1 Mark Size 日志信息中 time 列对应的项目进度信息

Tab.1 Project progress information corresponding to the time column in the Mark Size log message

日志信息行数	进度信息
第一行	项目开始时间
第二行	活动单元的最早完成时间 T_{ef}
第三行	活动单元的最晚完成时间 T_{lf}
第四行	项目最长路径完成时间

根据日志信息可以确定项目的关键路径完成时间和对应关键路径链信息。

(1)活动单元的活动总时差 TF :

$$TF = T_{lf} - T_{ef} \quad (5)$$

(2)关键活动路径:所有 $TF=0$ 的活动单元,即关键路径。

(3)关键路径完成时间:日志信息的第四行数据时间。

3.2 非固定持续时间下的关键路径信息

引入非固定持续时间函数,每次仿真的活动单元持续时间结果不同,相应的活动进度信息也会有所变化,因此收集仿真得出的所有数据,通过统计的方式确定非固定持续时间下的关键路径信息如下。

(1)活动单元的活动平均总时差 ATF :

$$ATF = \frac{\sum_{i=1}^N TF_i}{n} \quad (6)$$

(2)关键活动路径:统计仿真的各种关键路径的出现概率,根据概率大小确定主要关键路径和潜在关键路径。

(3)关键路径完成时间:统计仿真的关键路径完成时间频数,确定各种完成时间和相应的出现概率。

4 案例分析 (Case analysis)

4.1 案例 TCPN 进度模型的建立

某软件开发项目的功能开发活动工时信息如表 2 所示,项目组的人员构成信息如表 3 所示。

表 2 某软件开发项目的功能开发活动工时信息

Tab.2 Work time information of function development activities for a certain software development project

代号	活动名称	乐观时间/d	期望时间/d	悲观时间/d	后置活动	优先级	类型
S1	软件系统架构设计	4	5	7	S1、S2、S3	中	软件设计
S2	A 模块系统详细设计	1	2	3	S5	低	软件设计
S3	B 模块系统详细设计	1	3	5	S6	高	软件设计
S4	C 模块系统详细设计	2	3	4	S7	低	软件设计
S5	A 模块 UI 设计	2	3	5	S8、S9	低	UI 设计
S6	B 模块服务端编码	2	4	5	S10	低	服务端
S7	C 模块 UI 设计	2	3	5	S10、S11	低	UI 设计
S8	A 模块客户端编码	2	4	6	S12	低	客户端
S9	A 模块服务端编码	4	5	7	S12	低	服务端

续表

代号	活动名称	乐观时间/d	期望时间/d	悲观时间/d	后置活动	优先级	类型
S10	C 模块服务端编码	4	6	7	S13	低	服务端
S11	C 模块客户端编码	1	3	4	S13	低	客户端
S12	A 模块测试	2	3	4	S14	低	测试
S13	BC 模块集成测试	1	2	3	S14	低	测试
S14	ABC 模块集成测试	1	3	4	S15	低	测试
S15	验收	1	2	3	无	低	软件设计

表 3 项目组的人员构成信息

Tab.3 Project team composition information

类型	软件设计	UI 设计	客户端	服务端	测试
人数/人	2	1	1	2	1

基于表 2 的信息,构建软件开发项目的双代号网络图(图 5)。使用 CPN Tools 对此双代号网络进行基于 TCPN 的进度模型建模映射。

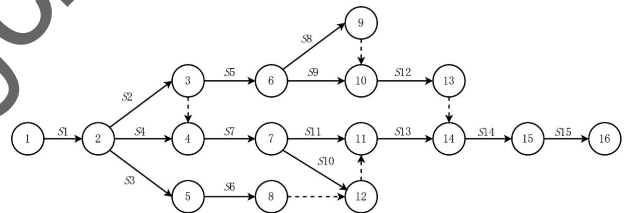


图 5 构建软件开发项目的双代号网络图

Fig. 5 Constructing AOA for a software development project

CPN Tools 建模过程中颜色集和变量的定义如下:

$closest PN = productINT * STRING timed;$

$closest PR = productINT * STRING timed;$

$closest PS = productINT * STRING timed;$

$var p : PN;$

$var r : PR;$

$var m : PN;$

$var j : PR;$

起始节点库所上的初始标识为(0,“x”),数量为 1,表示项目的进度情况;各资源库所上的初始标识为(n,“string”),表示具体的资源,其中 n 为资源编号,“string”为资源名称,标识数量等同于资源数量。

图 6 为建模后的基于 TCPN 的进度模型,模型中各库所的含义如表 4 所示,变迁的含义如表 5 所示。

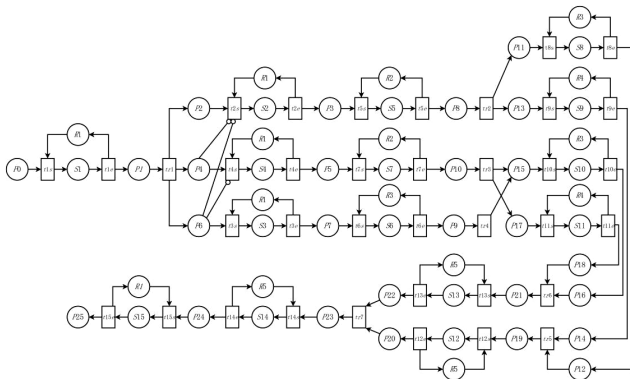


图6 建模后的基于TCPN的进度模型

Fig. 6 Modeled TCPN-based schedule models

表4 建模后的基于TCPN的进度模型各库所的含义

Tab.4 Meaning of each library in the modeled TCPN-based schedule model

TCPN-based schedule model		
序号	含义	序号 含义
P0	项目开始	P11 S8 活动就绪
P1	S1 活动完成	P12 S8 活动完成
P2	S2 活动就绪	P13 S9 活动就绪
P3	S2 活动完成	P14 S9 活动完成
P4	S4 活动就绪	P15 S10 活动就绪
P5	S4 活动完成	P16 S10 活动完成
P6	S3 活动就绪	P17 S11 活动就绪
P7	S3 活动完成	P18 S11 活动完成
P8	S5 活动完成	P19 S12 活动就绪
P9	S6 活动完成	P20 S12 活动完成
P10	S7 活动完成	P21 S13 活动就绪
P22	S13 活动完成	
P23	S14 活动就绪	
P24	S14 活动完成	
P25	S15 活动完成/项目结束	

表5 建模后的基于TCPN的进度模型变迁的含义

Tab.5 Meaning of modeled TCPN-based schedule model variants

序号	含义	序号 含义	序号 含义
t1s	S1 活动开始	t7e	S7 活动完成
t1e	S1 活动结束	t8s	S8 活动开始
t2s	S2 活动开始	t8e	S8 活动结束
t2e	S2 活动结束	t9s	S9 活动开始
t3s	S3 活动开始	t9e	S9 活动结束
t3e	S3 活动结束	t10s	S10 活动开始
t4s	S4 活动开始	t10e	S10 活动结束
t4e	S4 活动结束	t11s	S11 活动开始
t5s	S5 活动开始	t11e	S11 活动结束
t5e	S5 活动结束	t12s	S12 活动开始
t6s	S6 活动开始	t12e	S12 活动结束
t6e	S6 活动结束	t13s	S13 活动开始
t7s	S7 活动开始	t13e	S13 活动结束
t14s	S14 活动开始	tr1	过渡节点
t14e	S14 活动结束	tr2	过渡节点
t15s	S15 活动开始	tr3	过渡节点
t15e	S15 活动结束	tr4	过渡节点
		tr5	过渡节点
		tr6	过渡节点
		tr7	过渡节点

4.2 某软件开发项目关键路径信息的确定

对基于 TCPN 的进度模型进行 110 次仿真实验后,整理活动单元的日志数据得到软件开发项目的关键路径信息(表 6)。

表6 软件开发项目的关键路径信息

Tab.6 Critical path information of software development projects

路径	概率/%	关键路径活动
关键路径 1	17.3	S1、S3、S4、S5、S6、S7、S8、S10、S12、S14、S15
关键路径 2	71.8	S1、S3、S4、S5、S6、S7、S9、S10、S12、S14、S15
关键路径 3	4.5	S1、S3、S4、S5、S6、S7、S9、S10、S13、S14、S15
关键路径 4	0.9	S1、S3、S4、S5、S6、S7、S8、S10、S13、S14、S15
关键路径 5	3.6	S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S9、S10、S12、S14、S15
关键路径 6	1.8	S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S9、S10、S13、S14、S15

由表 6 可以看出软件开发项目可能出现的关键路径有 6 条,其中关键路径 2 的出现概率最高,达 71.8%,是项目的主要关键路径,其余为潜在的关键路径。

表 7 为主关键路径完成时间概率分布。

表7 主关键路径完成时间概率分布

Tab.7 Probability distribution of main critical path completion time

组别	组距/d	累积概率/%
1	27.0	0.00
2	27.5	1.27
3	28.0	3.80
4	28.5	8.86
5	29.0	11.39
6	29.5	22.78
7	30.0	31.65
8	30.5	36.71
9	31.0	50.63
10	31.5	58.23
11	32.0	64.56
12	32.5	72.15
13	33.0	83.54
14	33.5	87.34
15	34.0	92.41
16	34.5	94.94
17	35.0	97.47
18	35.5	100.00

主关键路径活动平均总时差如表 8 所示,是非关键活动在仿真过程中自身所有总时差情况的平均值,表示非关键活动即使延迟也不会影响进度的可延迟天数。

表8 主关键路径活动平均总时差

Tab.8 ATF of main critical path activities

活动代号	S2	S8	S11	S13
平均总时差/d	20.9	18.7	36.7	47.3

本文采用基于 TCPN 的进度模型计算约束条件下,项目关键路径的完成时间及相应的发生概率,结合传统关键路径法和 PERT 技术的优势。若用关键链技术计算本文列举案例的完成时间,采用根差法^[17]计算缓冲区大小,则可得到本文列举案例的完成时间为 34 d,在基于 TCPN 的进度模型的计算结果中,项目完成时间为 34 d 的概率为 92.41%。此结果基本可以说明模型在约束条件下的软件项目完成时间的预测能力,基于 TCPN 的进度模型能够得到与传统关键链技术接近的结果。

5 结论(Conclusion)

基于 TCPN 的进度管理模型具有的可执行性建模的特点,使得进度管理可及时响应由环境变化带来的影响,解决了关键路径法不能有效运用于存在约束条件的软件开发项目的问题,扩大了关键路径法的应用范围。与关键链法相比,基于 TCPN 的进度管理模型不仅实现了约束条件下的完成时间预测,还实现了关键路径信息的获取;与传统的关键路径法相比,扩展了关键路径法的分析维度,可分析得出项目的潜在关键路径信息,为项目进度决策分析增加了风险分析维度,帮助项目管理人员明确软件项目进度管理的重点,实现约束条件下的有效进度管理,适应敏捷开发的要求。

在后续的研究工作中,将会增加模型中的约束条件类型,使得进度模型能为进度管理决策提供更具有现实意义的信息输入。

参考文献(References)

- [1] FIGUEROA-GARCÍA J C, HERNÁNDEZ-PÉREZ G, RAMOS CUESTA J S. Uncertain project network analysis with fuzzy PERT and Interval Type-2 fuzzy activity durations[J]. Heliyon, 2023, 9(4): e14833.
- [2] BAO Z K, CHEN L, QIU K J. An aircraft final assembly line balancing problem considering resource constraints and parallel task scheduling[J]. Computers & industrial engineering, 2023, 182: 109436.
- [3] SOURAVLAS S, ANASTASIADOU S, KOSTOGLIOU I. A novel method for general hierarchical system modeling via colored petri nets based on transition extractions from real datasets[J]. Applied sciences, 2022, 13(1): 339.
- [4] MEJÍA G, NIÑO K, MONTOYA C, et al. A Petri Net-based framework for realistic project management and scheduling[J]. Computers and operations research, 2016, 66(C): 190-198.
- [5] 李海凌,刘克剑,施浩然. 基于 Petri 网 workflow 技术的工程项目群管理研究[M]. 北京:机械工业出版社,2018:11.
- [6] 韩耀军. 基于带标记的并发可达标识图的关键路径的求解方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(11): 121-125, 141.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 吴亚丽,何淑婷,杨延西,等. 基于时延 Petri 网与 BSO 的铝挤压线排产调度优化[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(1): 178-189.
- [10] ZHONG W J, ZHOU J T, SUN T. Concurrent software fine-coarse-grained automatic modelling by Coloured Petri Nets for model checking[J]. IET software, 2023, 17(1): 55-75.
- [11] 田启华,祝威,梅月媛,等. 基于模糊理论的并行耦合设计任务工期优化[J]. 制造技术与机床, 2018(11): 132-136.
- [12] 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.
- [13] 张玮,夏传良. 基于带抑制弧的 Petri 网表示的嵌入式系统模型的子网化简[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(3): 213-217, 301.
- [14] 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.
- [15] 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, 202.
- [16] 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.
- [17] 张向睿,董雄报,向华. 基于 Z-number 模糊数的管理信息系统开发项目缓冲区研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(23): 188-195.

作者简介:

- 李 鸿(1997-),男,硕士生。研究领域:信息系统项目管理。
- 倪 枫(1982-),男,博士,副教授。研究领域:系统科学,系统分析与集成。本文通信作者。
- 刘文诚(2000-),男,硕士生。研究领域:系统建模与仿真,大数据分析。
- 刘 姜(1983-),女,博士,副教授。研究领域:复杂系统理论与方法,符号代数计算。
- 陈年年(2003-),女,本科生。研究领域:管理科学与工程。
- 周兴郡(2003-),女,本科生。研究领域:管理科学与工程。