

# 基于 Petri 网技术进行多因素约束下的施工进度管理研究

付 饶

上海市浦东新区建设(集团)有限公司 上海市 200126

**摘要:** 工程项目的施工进度管理工作日趋复杂,然而传统的管理方法往往难以有效应对施工过程中受多因素制约的情况。因此,研究一种能够综合考虑多种因素约束条件下的施工进度管理方法具有重要意义。本文提出了一种在多因素约束下基于 Petri 网技术进行施工进度管理的方法。首先,对 Petri 网的基本原理进行了简要的介绍,引入了延迟时间 Petri 网技术。然后,提出通过延迟时间 Petri 网技术进行多因素约束下施工进度管理的合理性和可行性,并给出了构建施工进度管理 Petri 网模型的步骤,包括任务节点、约束关系以及时间参数的设置。再次,结合真实的工程案例构建了一个延迟时间 Petri 网施工进度管理模型,并对模型的时间约束加以分析。最后,总结了本文的主要贡献和局限性,并提出了未来研究方向。

**关键词:** 建筑工程; Petri 网; 多因素约束; 施工进度管理

建筑工程所具有的复杂性特征,使其在建设过程中会受到多种因素的制约,这种制约将对工程施工进度造成影响,故多因素约束下施工进度管理方法的研究就显得尤为重要。施工进度管理不仅对工程工期目标能否达成起着决定性作用,还将直接影响到项目的成本控制和质量保证。然而,在工程建设实践中,传统的进度管控方法很难有效应对多种因素对进度计划执行的约束,如资源分配不均、恶劣天气干扰、物料供应不足、产业政策调整,以及施工设备故障等情况的发生等。近年来, Petri 网技术作为一种可视化的数字模型工具,以其描述动态系统行为的强大能力,在管理领域得到了广泛的关注和应用。因此,本文提出了基于 Petri 网的施工进度管理方法,以期为解决多因素约束下的施工进度管理问题提供新的思路和方法。

## 1 Petri 网技术的理论基础

Petri 网技术由 Carl A. Petri 博士于 1962 年提出,至今已发展成为一种较为完善的系统模型工具,其基本构成包括四个元素: P(库所)代表系统的状态; T(变迁)代表任务之间的转换或活动; A(有向弧)代表库所和变迁的关系、以及 Token(令牌)代表数据或信号的流动,系统流程种任务的开始可以通过变迁触发(Fire)来实现。由于变迁的触发和可触发都具有局部性,促使 Petri 网具备了动态性、并发性和可扩展性等特点,也使其能够有效完成对复杂系统行为的描述和分析。

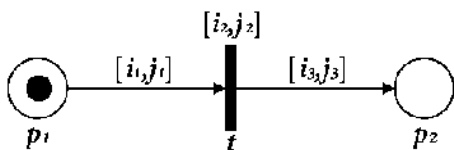


图 1 TPN 的演示示例

遗憾的是在基本 Petri 网中并不包含时间属性,但对于工程项目的进度管理而言,工期延误的发生与事件延续时间关系密切,这使基本 Petri 网在描述施工进度管理过程时存在着明显的缺陷,故引入了 Petri 网的一种扩展形式:延迟时间 Petri 网(TPN)。既通过在基本 Petri 网的 T 元素上附加一个时间参数区间 D 来弥补这一缺陷,并且所附加的时间参数可以是确定的,也可以是随机分布的,这就使模型能够反应出进度管理过程的时间依赖性。例如,图 1 为延迟时间 Petri 网片段演示,图中用  $[i, j]$  代表了对应的时间单元:①在  $p_1$  与  $t$  之间有向弧上的静态延迟区间  $[i_1, j_1]$  表示令牌到达  $p_1$  后,使  $t$  触发所需要的延迟时间;②  $t$  与  $p_2$  之间有向弧上的静态延迟区

间  $[i_2, j_2]$  则表示在  $t$  被触发后,令牌到达  $p_2$  所需要的时间;③位于  $t$  位置的静态触发区间  $[i_3, j_3]$  则表示  $t$  可触发后到触发的时间。

利用根据工程实际情况构建出的延迟时间 Petri 网模型来反映施工进度状态及施工任务之间的相互关系,能直观的找出影响施工整体进度的因素,并能够预测进度计划在目标时间内可能受到的约束,从而评估进度计划的可执行性,并实现对施工进度的有效监控与优化调整。

## 2 构建多因素约束下的施工进度管理 Petri 网模型

### 2.1 多因素约束分析

建筑业的发展促使工程项目的外部市场需求和内部运行模式均处于不断的变革中。工程建设过程必然会受到多种因素的约束,使施工进度管理的复杂性加剧。为了利用延迟时间 Petri 网构建出一个能够综合考虑多种因素约束的施工进度管理模型,需要从不同工程项目的个性特征入手,对施工过程中的各个环节进行深入分析,通过科学的技术方法识别制约进度计划有效执行的各类因素,并将其反映在进度管理模型中,对其进行主动干预和专项预控,从而保障施工进度管理工作的有效推进。

首先,在工程项目建设初期,利用 WBS 完成施工内容分解,并将分解后的各项工作层次化,细分出不同的执行阶段和子阶段。找到每项工作的触发条件,明确各项工作的开始时间、结束时间、资源配给要求,以及与其他任务的依赖关系等信息。

其次,结合项目特点和管理经验识别出项目实施过程中可能对进度计划造成影响的各类事件,即找到约束因素。通过对以往研究的归纳,可将一般性约束划分为外部因素和内部因素两类。外部因素由客观事件造成,如相关政策调整、社会生态改变、经济环境变化等,这类约束不随人的主观意志转移,一旦发生必将影响到进度计划的执行,因此在构建 Petri 网模型初期很难予以充分考虑。内部因素则可以识别为技术因素和非技术因素,技术因素如设计变更、施工方案调整等;非技术因素如:资源配置不足、机械设备故障等。这些因素都可能会对进度计划造成影响,需要在构建模型时予以充分考虑。

最后,将工程项目施工过程的不同阶段(子阶段)和识别出的约束因素组合分析,预测每一施工阶段约束产生的概率和对进度的影响程度,根据实际情况为每一施工阶段(子阶段)预设触发条件和触发的时间参数,以确保模型的准确性和实用性。

构建延迟时间 Petri 网模型时,可将施工过程的每个阶段(子

阶段)都用一个 Petri 网片段来表示,其中包含相应的任务节点、约束关系以及时间参数。最后再将各个阶段(子阶段)的 Petri 网片段连接起来,从而形成一个完整的 Petri 网进度管理模型。

### 2.2 延迟时间 Petri 网模型的构建步骤

构建基于 TPN 的施工进度管理模型,首先要选择一款适合的 Petri 网工具,如 CPN Tools、PIPE 等,以辅助我们完成模型的构建,并为模型的仿真和验证工作提供方便。关于 Petri 网工具的选择,可考虑以下几个方面:首先,工具能否支持所需的 Petri 网类型和功能;其次,操作界面是否友好;最后,工具的维护性及可扩展性。

构建施工进度管理 Petri 网模型的一般步骤如下:

(1) 定义系统要素:根据对工程内容划分出的阶段(子阶段)梳理各项工作关系,识别各项工作执行过程中约束因素,定义各类关键元素,包括任务名称、约束因素、任务状态、时间约束等。

(2) 构建 Petri 网初始结构:集合关键元素形成初始 Petri 网结构,确保每个约束因素都有明确的输入库所和输出库所。

(3) 设置时间参数区间:明确 t 的触发条件,为约束因素设置时间参数区间。其时间参数可固定,也可设置为某种概率分布的随机变量。例如,混凝土养护需要 28 天,则可为该约束因素设置一个 28 时间单位的延迟。

(4) 建立时间约束:根据项目工期要求,明确每项工作的 ES

和 LS,并在 Petri 网模型上将其体现为有向弧上的时间属性。

(5) 模拟和验证:模型构建完成后,可通过模拟实验,观察在不同时间参数和约束条件下的施工进度情况。验证模型能否准确反映实际施工过程中的时间依赖性和动态变化。

通过上述步骤,可以构建出在多因素约束下施工进度管理的 TPN 模型,并能够反映出各项施工内容的时间因素依赖程度,有助于提高进度管理的效率和成功率。

### 3 实例应用与分析

上海市浦东新区某保障性住房外墙保温维修工程,该项目属于旧城改造的惠民项目,项目所在小区 2012 年建造,房龄 12 年,由 18 栋住宅楼组成,墙体材料为 200 厚混凝土多孔砖,项目所涉及的外墙维修面积约 127490.27 m<sup>2</sup>。

#### 3.1 根据项目工期要求进行施工内容分解

项目施工总工期 365 个日历天,项目施工内容划分为 6 个阶段任务,分别为:①施工准备、②第一阶段(1~5#楼)外墙保温维修、③第二阶段(6~10#楼)外墙保温维修、④第三阶段(11~14#楼)外墙保温维修、⑤第四阶段(15~18#楼)外墙保温维修、⑥场地恢复及竣工验收。由于②~⑤阶段任务所划分的子阶段任务内容相同,因此本文仅以②阶段任务为例,构建一个多因素约束下的施工进度管理 Petri 网模型。

表 1 阶段施工内容划分及其时间约束信息

阶段任务名称	编号	子阶段任务名称	工期(日历天)	备注
第一阶段(1~5#楼)外墙保温维修	1	施工准备	5	
	2	入户口及通道防护棚搭设	16	
	3	吊篮安装、挂牌验收	30	
	4	住户空调外机移除、防盗窗拆除	10	
	5	原外墙墙面保温层、涂料面全部铲除	40	
	6	基层清理并涂刷界面剂	60	
	7	屋面雨水斗、山墙出水口更换安装,空调板墙孔开凿与套管预埋	50	
	8	防水砂浆施工(底层、面层)	60	
	9	窗边防水硅胶封边、涂膜施工	30	
	10	抗裂砂浆施工(含网格布铺设)	60	
	11	反射隔热涂料、真石漆施工	60	
	12	外墙面雨水立管、空调滴水管更换	40	
	13	吊篮拆除、防护棚拆除与场地清理恢复	16	

第一阶段外墙保温维修阶段任务可以进一步细化为五个号楼的外墙保温维修施工做为子阶段任务,因此为了演示方便,本文仅对一号楼的施工进度加以建模演示。为了方便时间约束的计算,拟定除“施工准备”之外的任务工期取子阶段任务工期的平均值。

#### 3.2 施工过程中的约束因素识别

根据项目的个性特点分析,除资源分配、设备保障,以及满足工序要求的必要时间等约束因素外,识别出项目施工过程中将产生约束的个性化因素如下表所示:

表 2 项目个性化约束因素识别

序号	约束事件	约束条件	备注
1	扬尘、粉尘控制	原保温层凿除施工期间扬尘、粉尘严重,很容易收到居民投诉,处置不当会造成停工;安全文明施工管理要求高,施工难度大,影响施工进度	
2	坡屋面吊篮作业安全	屋面为坡屋面,为非标准吊篮安装施工,前期需根据现场时间情况编制具有针对性的专项施工方案,且必须经专家论证可行后方可施工。施工难度大,对安全施工管理要求高。施工期间应防范高坠、落物等造成的安全事故。	
3	居民人身和财产安全	小区居住人口密度大,日常出入人数多;小区内车位 786 个,私家车进出小区频繁。这都为施工期间的安全管理工作提出了更高的要求,一旦发生事故将直接影响施工正常进行。	
4	恶劣天气影响	项目为露天作业,工期贯穿全年,高温、台风、暴雨及严冬等恶劣天气都将直接影响到影响施工作业的正常进行。	
5	建筑结构和管线保护	住宅小区内管线较多,外墙原有居民自行安装的晾衣架、花架、防盗窗及空调外机支架均需做好前期处理工作,避免因处理不当影响施工进度。	

#### 3.3 构建 Petri 网模型

为演示多因素约束下的施工进度管理 Petri 网模型的构建,假设本项目的劳动力和施工物料的配备能够满足施工要求;施工设备

在施工期间状态良好,无须占用工期保养和维修。构建的 Petri 网模型如图 2 所示。

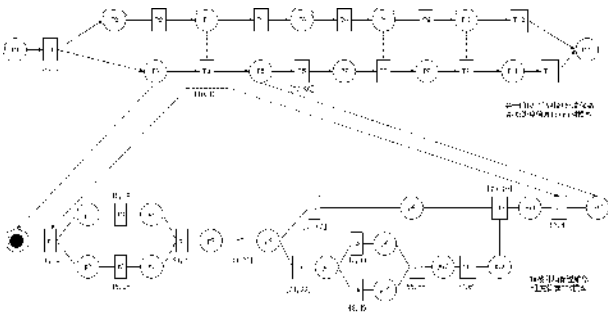


图2 第一阶段外墙保温维修进度管理 Petri 网层次模型

表3 1#楼外墙保温维修进度管理 TPN 模型中库所含义

库所	含义	库所	含义
P1	施工手续办理	p6	墙面保温层、涂料铲除后基层质量验收
P2	扬尘治理	p7	界面剂养护及质量验收
P3	1#楼外墙保温维修施工开始	p8	预埋件施工质量验收
P4	扬尘监控数据审核	p9	防水砂浆养护及施工质量验收
p1	与物业及居民的沟通	p10	防水硅胶及涂膜施工质量验收
p2	吊篮方案通过专家论证可行	p11	抗裂砂浆养护及质量验收
p3	防护棚安装质量验收并挂牌使用	p12	反射隔热涂料分工序质量验收
p4	吊篮第三方验收	p13	整体施工质量验收
p5	1#楼外立面清理情况验收	p14/P5	1#楼维修施工区域清理交物业验收

模型中用变迁来定义分解的工作任务，并用*i, j*定义了每一个变迁的最早开始时间和最迟开始时间，以便于时间参数的计算。由

### 3.4 模型参数及时间约束

根据一号楼的施工进度计划，其工期组织是依据施工工序间的逻辑编制的，各项工作的开始时间均由其紧前工作的最晚完成时间决定，但在以往的进度管理方法中，没有考虑到其紧前工作完成后其它制约因素也很可能影响到当前工作的工期，故在 Petri 网模型中将库所设置为隐藏的制约因素，用有向弧的时间来设定这些隐藏因素对工期的影响。从而更为准确的判定变迁所代表工作任务能否严格按照计划执行。为便于解读模型，库所的含义定义如下表3。

于约束因素的时间阐述为随机变量，无法准确估算变迁触发的时点，故采用相对时间来定义变迁和含义及其时间约束如表4所示。

表4 1#楼外墙保温维修进度管理 TPN 模型变迁含义及时间约束

元素	含义	时间约束	延迟时间
T1	第一阶段（1~5#楼）外墙保温维修	[0, 0]	@+10
T2	扬尘监控	[10, 10]	@+expTime ( )
T3	1#楼外墙保温维修	[10, 10]	@+81
t1	施工准备，划分维修施工区域	[10, 10]	@+5
t2	入户口及通道防护棚搭设	[15, 18]	@+3+expTime ( )
t3	吊篮安装	[15, 15]	@+6+expTime ( )
t4	住户空调外机移除、防盗窗拆除	[21, 21]	@+2+expTime ( )
t5	原外墙墙面保温层、涂料面全部铲除	[23, 23]	@+8+expTime ( )
t6	基层清理并涂刷界面剂	[31, 31]	@+12+expTime ( )
t7	屋面雨水斗、山墙出水口更换安装，空调板墙孔开凿与套管预埋	[31, 65]	@+10+expTime ( )
t8	防水砂浆施工（底层、面层）	[43, 43]	@+12+expTime ( )
t9	窗边防水硅胶封边、涂膜施工	[43, 43]	@+6+expTime ( )
t10	抗裂砂浆施工（含网格布铺设）	[55, 55]	@+12+expTime ( )
t11	反射隔热涂料、真石漆施工	[67, 67]	@+12+expTime ( )
t12	外墙雨水立管、空调滴水管更换	[79, 79]	@+8+expTime ( )
t13	吊篮拆除、防护棚拆除与场地清理恢复	[87, 87]	@+3+expTime ( )

### 4 模型正确性验证

判定基于 Petri 网技术过程模型的正确性，可根据如下规则判别：

- 模型运行后，终点库所中有  $M(p) = 1 (p=0)$ ，其余库所中有  $M(p) = 1 (p \neq 0)$ ，则该模型正确。
- 模型中令牌传输经过所有变迁，说明模型中无死变迁；由于本文所构建的 Petri 网施工进度管理模型是用于描述施工过程的时间约束关系的模型，因此令牌根据进度计划按工序进行传递，故满足判定模型正确的判别条件，可判定该模型是正确可行的。

### 5 结束语

本文提出了一种基于 Petri 网的施工进度管理方法，旨在解决多因素约束下的施工进度管理问题。然而，本文的研究仍存在一定的局限性。未来研究方向包括：完善 Petri 网模型的构建，并逐步完善模型结构，提高模型的可扩展性；探索模型的优化算法；研究

如何将 Petri 网与其他技术相结合，以进一步提升施工进度管理的智能化水平。

### 参考文献：

- [1]袁崇义.Petri 网原理与应用[M].北京：电子工业出版社，2005.
- [2]刘睿，张宇清，赵振宇. 建设项目中的工期延误影响因素研究[J].建筑经济.2007 ( S1 )： 114-118.
- [3]黄必清，钟剑辉，张毅，易晓春. 基于 Petri 网的施工进度计划仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版).2013, 53 ( 11 )： 1609-1616.
- [4]杨丽. 基于 petri 网的土建工程 workflow 建模[J]. 湘南学院学报.2013, 34 ( 05 )： 39-41, 95.
- [5]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.
- [6]高云.基于 WBS 和 Petri 网的项目计划反馈模型构建[J].项目管理技术, 2018, 16 ( 06 )： 52-55.