

华中科技大学

Wednesday, April 16, 2025

工程项目数据建模与施工模拟计算

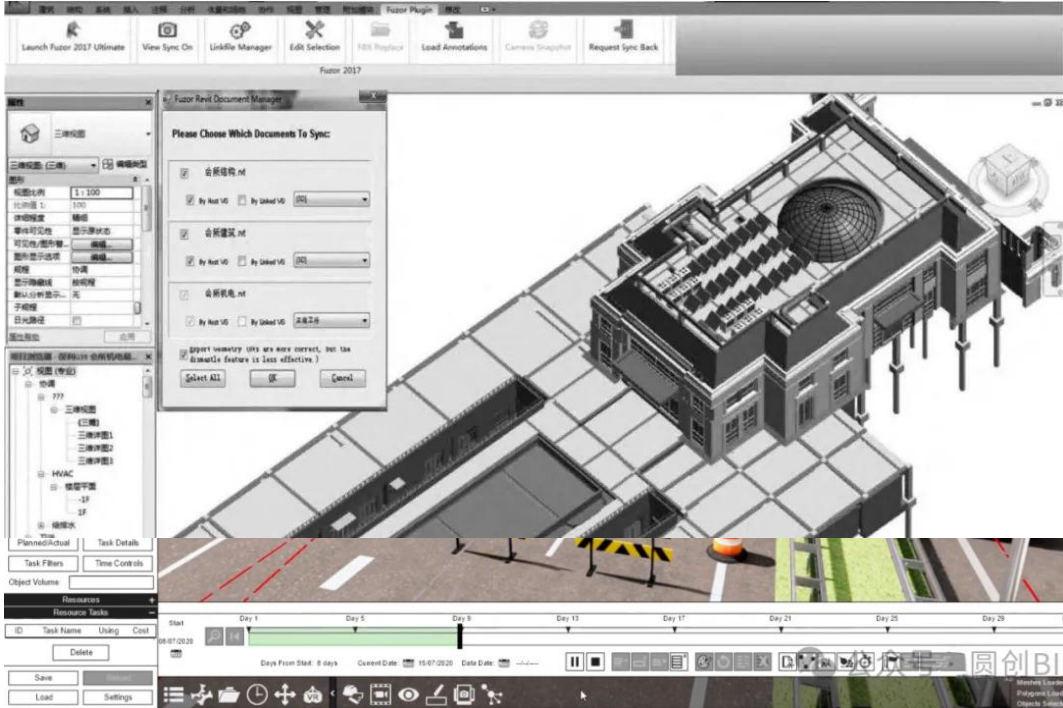
Agent-Based Simulation of Construction workflows and Information flow

邱峰

背景1：建筑工程项目的复杂性和工程管理方法

- 建筑施工项目的复杂性与不确定性是建筑行业面临的重大挑战。甘特图是一种静态的计划工具，无法实时反映施工现场的实际情况，如天气变化、资源短缺、设计变更等。这些不确定性因素会导致计划与实际执行之间的脱节，进而引发一系列问题，如工期延误、成本增加和资源浪费。
- 为解决这些问题，施工模拟仿真技术被引入，通过建立虚拟模型，对施工过程进行动态模拟和分析，帮助管理者更好地理解 and 预测施工过程中的各种变化。这种技术能够模拟施工过程中的各种事件和行为，包括资源分配、工序协调、干扰因素等，从而为施工计划的优化提供科学依据。

						施工进度计划表																							
						2025 年																							
项目名称	每天施工人数	定额总用工天数	开始时间	结束时间	施工天数	1 月				2 月				3 月				4 月				5 月				6 月			
						5	10	15	20	25	31	5	10	15	20	25	31	5	10	15	20	25	31	5	10	15	20	25	31
一层顶板楼梯钢筋绑扎及柱合模	1	2	2025/1/1	2025/5/15	134																								
一层顶板楼梯砼浇筑	5	10	2025/1/5	2025/1/25	20																								
二层测量放线	1	1	2025/2/3	2025/2/17	14																								
二层满堂架搭设绑扎柱钢筋	7	25	2025/3/12	2025/4/18	37																								
二层顶板楼梯模板铺装	5	12	2025/5/1	2025/5/19	749																								
二层顶板楼梯钢筋绑扎及柱合模	3	14	2023/1/6	2023/1/20	14																								
二层顶板楼梯砼浇筑	7	12	2023/5/19	2023/6/21	33																								
三层测量放线	8	10	2023/2/8	2023/3/22	42																								
三层满堂架搭设绑扎柱钢筋	1	2	2023/1/9	2023/1/23	14																								
三层顶板楼梯模板铺装	1	6	2023/1/10	2023/1/24	14																								
一层顶板楼梯钢筋绑扎及柱合模	1	2	2023/1/11	2023/1/25	23																								
一层顶板楼梯砼浇筑	5	10	2023/1/12	2023/1/26	14																								



背景2：仿真方法

• 三大类仿真方法：

1. SD: System Dynamic

- 系统动力学，战略层面仿真，强调因果回馈；

2. AB: Agent-Based

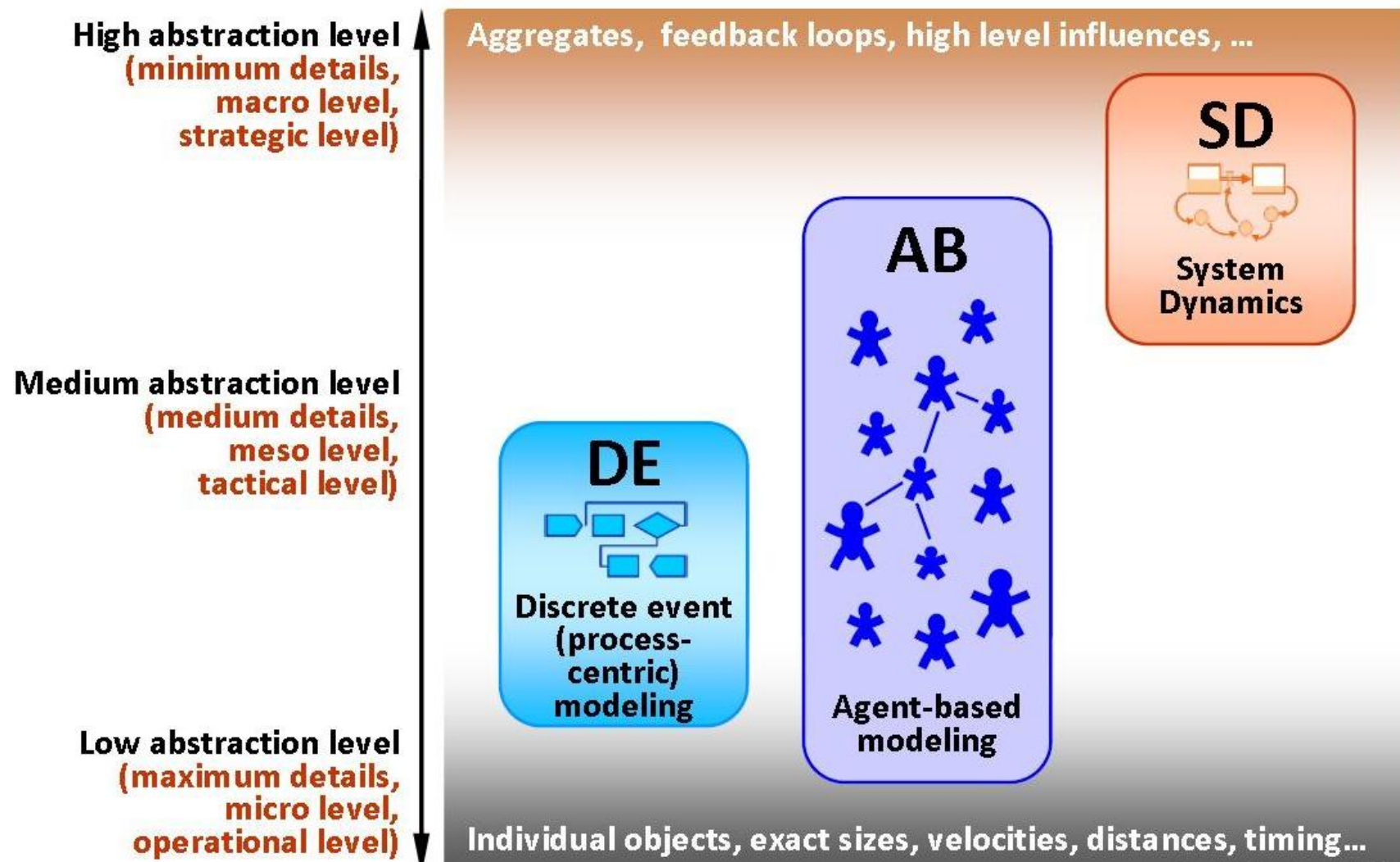
- 代理人，运营/操作层面仿真，强调互动；

3. DE: Discrete Event

- 离散事件，运营/操作层面仿真，强调环环相扣的程序。

➤ 离散事件模拟（DES）是一种常用的施工仿真方法，通过事件驱动的方式模拟施工过程中的关键事件和状态变化。然而，DES在处理施工主体的独立行为和动态交互方面存在一定的局限性。

➤ 基于代理的仿真则通过模拟施工主体（如工人、机器、任务等）的自主行为和交互，能够更真实地反映施工过程中的复杂性和动态性。



- ✓ **DES:** 适合模拟事件驱动的系统，如生产流程、排队系统等，强调事件的顺序和时间点。
- ✓ **ABM:** 适合模拟复杂系统中多个代理之间的交互，如施工中的工人、机器和任务的动态协作。

研究内容：基于代理的施工程序模拟（三个组成部分）



Agent（代理） 代表施工过程中的个体（如工人、机器等）。

代理的行为包括但不限于：

- Perception change（感知变化）：代理感知环境的变化。
- Site meeting（现场会议）：代理之间的沟通和协调。
- Decision making（决策制定）：代理根据感知的信息做出决策。

Task（任务） 代表具体的施工任务。

任务的属性包括但不限于：

- Workspace（工作空间）：任务所需的工作区域。
- Workload（工作量）：任务的工作量。
- Progress（进度）：任务的完成进度。



Event（事件） 代表施工过程中的动态变化。

事件的类型包括但不限于：

- Production rate change（生产率变化）：任务的生产率发生变化。
- Design change（设计变更）：施工设计的变更。
- Quality check（质量检查）：对施工质量的检查。

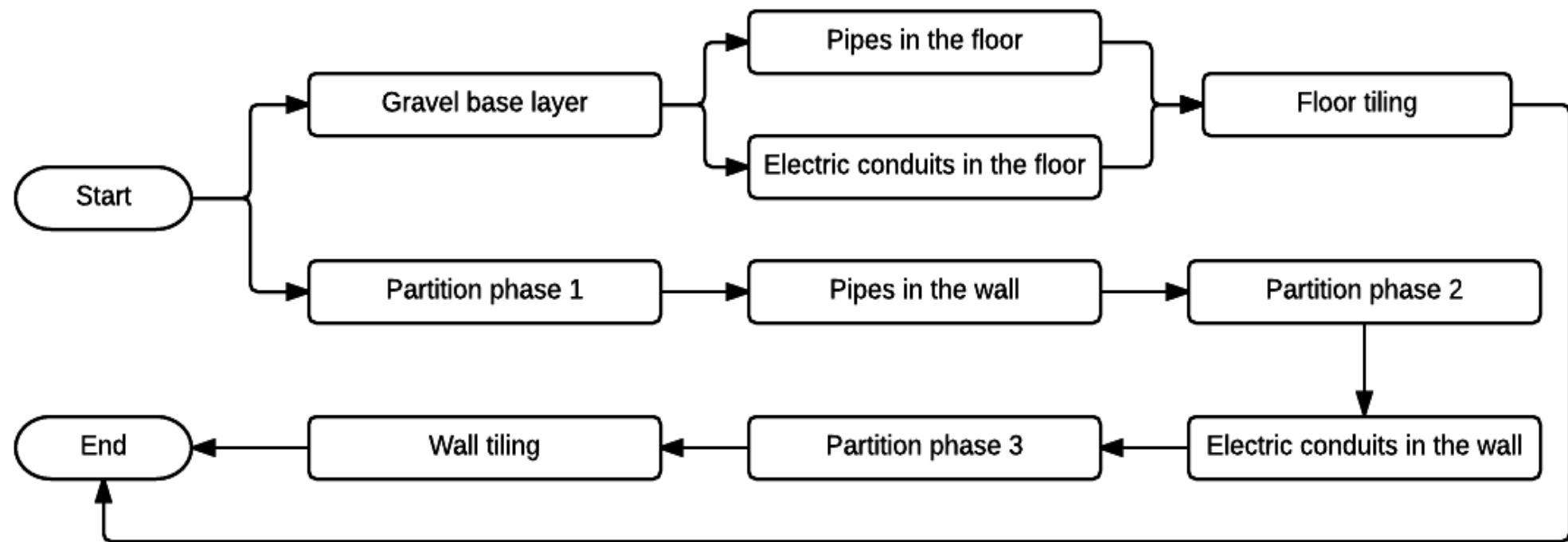
研究思考+问题提出+基本目标

- 思考以下问题：
 - 如何以参数化的方式模拟建筑工程中的各种施工活动场景？
 - 如何对工程施工流程中的可变性进行模拟建模与计算？
 - 如何量化分析判断施工现场的信息流的不确定性？
- 模拟的核心是代理、任务和事件之间的交互。
- 代理通过感知环境变化、参与现场会议和做出决策来影响任务的执行。
- 任务的进度和工作量受到事件（如生产率变化、设计变更等）的影响。
- 在复杂施工项目中，工序依赖、资源分配和不确定性（如工人效率波动、无效工作日）会显著影响项目周期。传统计划工具难以动态反映这些因素。通过基于代理的模拟，可帮助构建一个施工流程与信息流的数字化模型，从而实现：
 - 动态模拟多工种协作资源分配、工序依赖关系和跨楼层施工调度顺序等。
 - 量化模拟分析并计算效率的波动、返工、资源冲突等现实问题产生的影响。
 - 优化资源配置和工期预测。

具体应用：一个多工种参与的施工项目案例

- 基本介绍

Agent-Based Simulation of Construction workflows and Information flow



具体应用：一个多工种参与的施工项目案例

- 所用到的数据（模拟计算）

id	Trade	Number of people
1	Gravel	1
2	Plumbing	1
3	Electricity	1
4	Tiling	1
5	Partition	1

Space	InitialPriority
1	5
2	4
3	3
4	2
5	1

Process	Floor	InitialQuantity	Design Change Variation
Gravel base layer	1	170	17
Pipes in the floor	1	100	10
Electric conduits in the floor	1	80	8
Floor tiling	1	720	72
Partition phase 1	1	750	75
Pipes in the wall	1	190	19
Electric conduits in the wall	1	180	18
Partition phase 2	1	20	2
Wall tiling	1	290	29
Partition phase 3	1	200	20
...

id	Process	Trade	InitialProductionRate	QualityRate	PerformanceStd
1	Electric conduits in the floor	Electricity	51	0.9	8
2	Electric conduits in the wall	Electricity	41	0.9	2
3	Floor tiling	Tiling	62	0.9	9
4	Gravel base layer	Gravel	34	0.9	5
5	Partition phase 1	Partition	55	0.9	12
6	Partition phase 2	Partition	51	0.9	11
7	Partition phase 3	Partition	32	0.9	4
8	Pipes in the floor	Plumbing	69	0.9	5
9	Pipes in the wall	Plumbing	37	0.9	9
10	Wall tiling	Tiling	27	0.9	2



PredecessorProcess	SuccessorProcess
Gravel base layer	Pipes in the floor
Gravel base layer	Electric conduits in the floor
Pipes in the floor	Floor tiling
Electric conduits in the floor	Floor tiling
Partition phase 1	Pipes in the wall
Pipes in the wall	Partition phase 2
Partition phase 2	Electric conduits in the wall
Electric conduits in the wall	Partition phase 3
Partition phase 3	Wall tiling

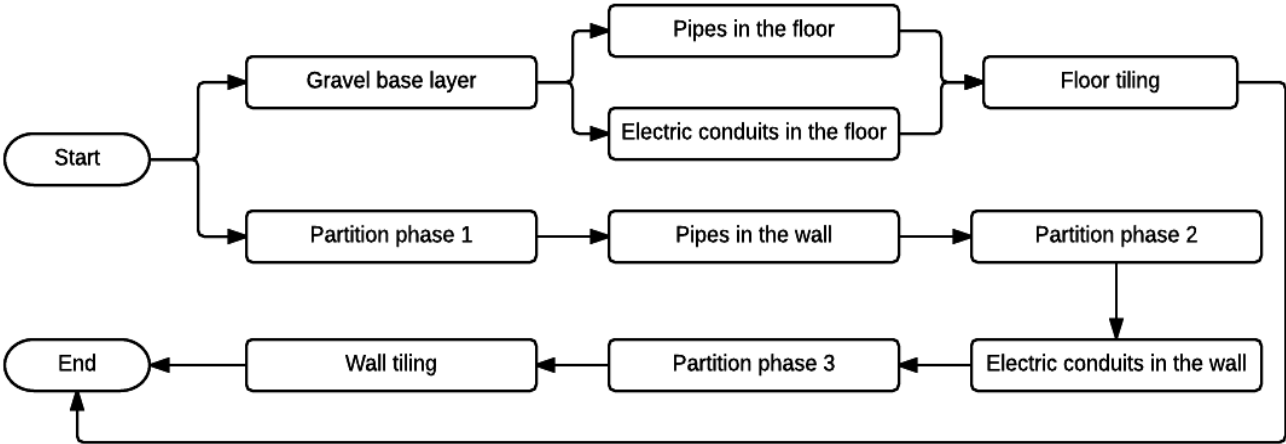
案例解释：工种(Trade) & 任务(Process)



- **Gravel**（碎石工）：负责铺设地基或基础层的碎石，确保地面平整和排水良好。
- **Plumbing**（管道工）：负责安装和维护供水、排水和卫生设施的管道系统。
- **Electricity**（电工）：负责安装和维护电气系统，包括照明、插座、开关和配电箱。
- **Tiling**（瓷砖工）：负责铺设地板和墙面的瓷砖，确保美观和耐用。
- **Partition**（隔墙工）：负责建造和安装隔墙，将空间分隔成不同的功能区域。

id	Process	Trade	InitialProductionRate	QualityRate	PerformanceStd
1	Electric conduits in the floor	Electricity	51	0.9	8
2	Electric conduits in the wall	Electricity	41	0.9	2
3	Floor tiling	Tiling	62	0.9	9
4	Gravel base layer	Gravel	34	0.9	5
5	Partition phase 1	Partition	55	0.9	12
6	Partition phase 2	Partition	51	0.9	11
7	Partition phase 3	Partition	32	0.9	4
8	Pipes in the floor	Plumbing	69	0.9	5
9	Pipes in the wall	Plumbing	37	0.9	9
10	Wall tiling	Tiling	27	0.9	2

id	Process	Trade
1	Electric conduits in the floor	Electricity
2	Electric conduits in the wall	Electricity
3	Floor tiling	Tiling
4	Gravel base layer	Gravel
5	Partition phase 1	Partition
6	Partition phase 2	Partition
7	Partition phase 3	Partition
8	Pipes in the floor	Plumbing
9	Pipes in the wall	Plumbing
10	Wall tiling	Tiling



id	Trade	Number of people
1	Gravel	1
2	Plumbing	1
3	Electricity	1
4	Tiling	1
5	Partition	1



案例解释：紧前紧后工作1(Dependency)



Gravel base layer



Pipes in the floor



Electric conduits in the floor



Floor tiling



案例解释：紧前紧后工作2(Dependency)



Partition phase 1



Pipes in the wall



Partition phase 2



Wall tiling



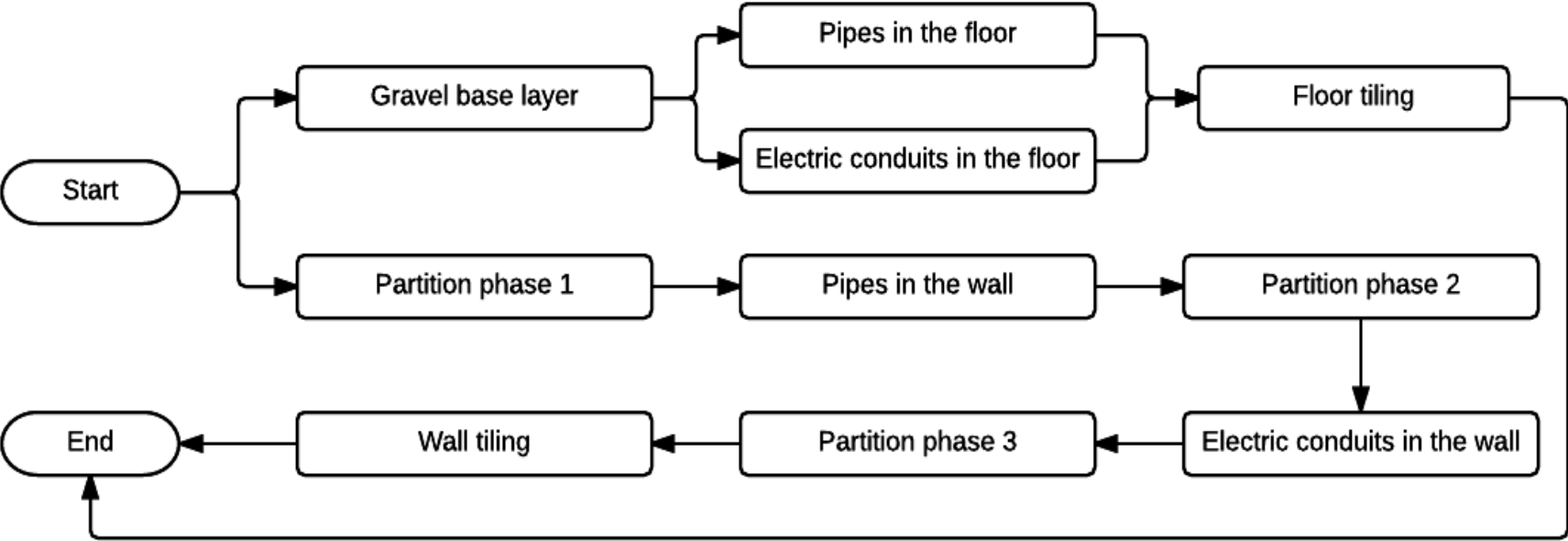
Partition phase 3



Electric conduits in the wall



案例解释：得出关联表(Dependency)



Space	InitialPriority
1	5
2	4
3	3
4	2
5	1



PredecessorProcess	SuccessorProcess
Gravel base layer	Pipes in the floor
Gravel base layer	Electric conduits in the floor
Pipes in the floor	Floor tiling
Electric conduits in the floor	Floor tiling
Partition phase 1	Pipes in the wall
Pipes in the wall	Partition phase 2
Partition phase 2	Electric conduits in the wall
Electric conduits in the wall	Partition phase 3
Partition phase 3	Wall tiling

Process	Floor	InitialQuantity	Design Change Variation
Gravel base layer	1	170	17
Pipes in the floor	1	100	10
Electric conduits in the floor	1	80	8
Floor tiling	1	720	72
Partition phase 1	1	750	75
Pipes in the wall	1	190	19
Electric conduits in the wall	1	180	18
Partition phase 2	1	20	2
Wall tiling	1	290	29
Partition phase 3	1	200	20
...

数据说明1: Trade的初始效率(Initial Production Rate)

- **Gravel**（碎石工）：负责铺设地基或基础层的碎石，确保地面平整和排水良好。
- **Plumbing**（管道工）：负责安装和维护供水、排水和卫生设施的管道系统。
- **Electricity**（电工）：负责安装和维护电气系统，包括照明、插座、开关和配电箱。
- **Tiling**（瓷砖工）：负责铺设地板和墙面的瓷砖，确保美观和耐用。
- **Partition**（隔墙工）：负责建造和安装隔墙，将空间分隔成不同的功能区域。

-- 初始化工种资源：插入所有工种，默认可用工人数为1

id	Trade	Number of people	...
1	Gravel	1	...
2	Plumbing	1	...
3	Electricity	1	...
4	Tiling	1	...
5	Partition	1	...



id	Process	Trade	InitialProductionRate	QualityRate	PerformanceStd
1	Electric conduits in the floor	Electricity	51	0.9	8
2	Electric conduits in the wall	Electricity	41	0.9	2
3	Floor tiling	Tiling	62	0.9	9
4	Gravel base layer	Gravel	34	0.9	5
5	Partition phase 1	Partition	55	0.9	12
6	Partition phase 2	Partition	51	0.9	11
7	Partition phase 3	Partition	32	0.9	4
8	Pipes in the floor	Plumbing	69	0.9	5
9	Pipes in the wall	Plumbing	37	0.9	9
10	Wall tiling	Tiling	27	0.9	2

指施工中的表现或性能，如施工效率、质量等...

是否返工的问题后面简化为随机10%无效，实际上可随需求对每个Trade（具体到人）进行设计。

同时每个人的Performance可能按照一定分布变化（例如正态分布），所以增加属性到Trade表中即可。

-- 生成10%无效日概率

```
is_invalid := (random() < 0.1);
-- 计算实际完成量：无效日为0，否则...
work_done := CASE
    WHEN is_invalid THEN 0
    ELSE GREATEST(1, ROUND(task_rec.initial_production_rate * (0.9 + 0.2 * random()))) * task_rec.available_workers)
END;
```


数据说明2： Process的初始总量(Initial Quantity)

```
('Gravel base layer',          ROUND(170 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 170),
('Pipes in the floor',         ROUND(100 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 100),
('Electric conduits in the floor', ROUND(80 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 80),
('Floor tiling',              ROUND(720 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 720),
('Partition phase 1',          ROUND(750 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 750),
('Pipes in the wall',          ROUND(190 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 190),
('Electric conduits in the wall', ROUND(180 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 180),
('Partition phase 2',          ROUND(20 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 20),
('Wall tiling',                ROUND(290 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 290),
('Partition phase 3',          ROUND(200 * (0.9 + 0.2 * random()))::INT, 200);
```

Process	Floor	InitialQuantity	Design Change Variation
Gravel base layer	1	170	17
Pipes in the floor	1	100	10
Electric conduits in the floor	1	80	8
Floor tiling	1	720	72
Partition phase 1	1	750	75
Pipes in the wall	1	190	19
Electric conduits in the wall	1	180	18
Partition phase 2	1	20	2
Wall tiling	1	290	29
Partition phase 3	1	200	20
...

过程模拟1-daily task details 初始化展示

数据初始化，然后找到开工的项目。

day	floor	process	trade	Initial Quantity	status	Initial production rate	Remain work	Predecessor processes	Pre Remain work	Trade available	Prerequisite completed	Can Start?
0	1	Electric conduits in the floor	Electricity	74	pending	51	74	Gravel base layer	154	1	FALSE	FALSE
0	1	Electric conduits in the wall	Electricity	164	pending	41	164	Partition phase 2	19	1	FALSE	FALSE
0	1	Floor tiling	Tiling	661	pending	62	661	Pipes in the floor, Electric conduits in the floor	74, 103	1	FALSE	FALSE
0	1	Gravel base layer	Gravel	154	pending	34	154	null	null	1	TRUE	TRUE
0	1	Partition phase 1	Partition	818	pending	55	818	null	null	1	TRUE	TRUE
0	1	Partition phase 2	Partition	19	pending	51	19	Pipes in the wall	175	1	FALSE	FALSE
0	1	Partition phase 3	Partition	216	pending	32	216	Electric conduits in the wall	164	1	FALSE	FALSE
0	1	Pipes in the floor	Plumbing	103	pending	69	103	Gravel base layer	154	1	FALSE	FALSE
0	1	Pipes in the wall	Plumbing	175	pending	37	175	Partition phase 1	818	1	FALSE	FALSE
0	1	Wall tiling	Tiling	271	pending	27	271	Partition phase 3	216	1	FALSE	FALSE

过程模拟2-第一天情况展示

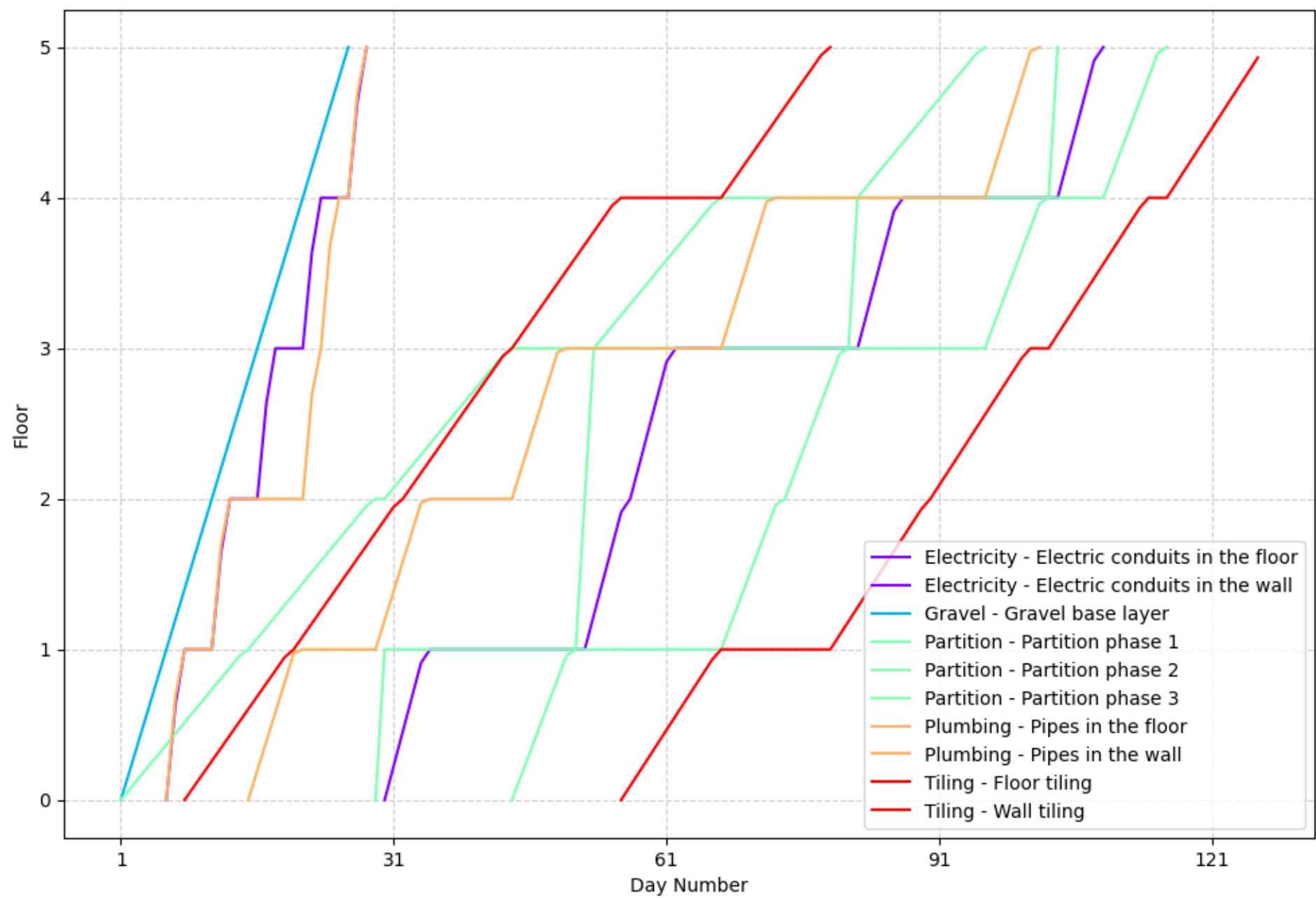
day	process	Assigned trade	Initial Quantity	status	ipr	Actual efficiency	remain_work	is_rework	today_workload	predecessor_processes	pre_remain_work	trade_available
1	Electric conduits in the floor	Electricity	74	pending	51	null	74	null	0	Gravel base layer	122	1
1	Electric conduits in the wall	Electricity	164	pending	41	null	164	null	0	Partition phase 2	19	1
1	Floor tiling	Tiling	661	pending	62	null	661	null	0	Pipes in the floor, Electric conduits in the floor	74, 103	1
1	Gravel base layer	Gravel	154	in_progress	34	32	122	FALSE	32	null	null	0
1	Partition phase 1	Partition	818	in_progress	55	58	760	FALSE	58	null	null	0
1	Partition phase 2	Partition	19	pending	51	null	19	null	0	Pipes in the wall	175	0
1	Partition phase 3	Partition	216	pending	32	null	216	null	0	Electric conduits in the wall	164	0
1	Pipes in the floor	Plumbing	103	pending	69	null	103	null	0	Gravel base layer	122	1
1	Pipes in the wall	Plumbing	175	pending	37	null	175	null	0	Partition phase 1	760	1
1	Wall tiling	Tiling	271	pending	27	null	271	null	0	Partition phase 3	216	1

过程模拟3-单个process结果

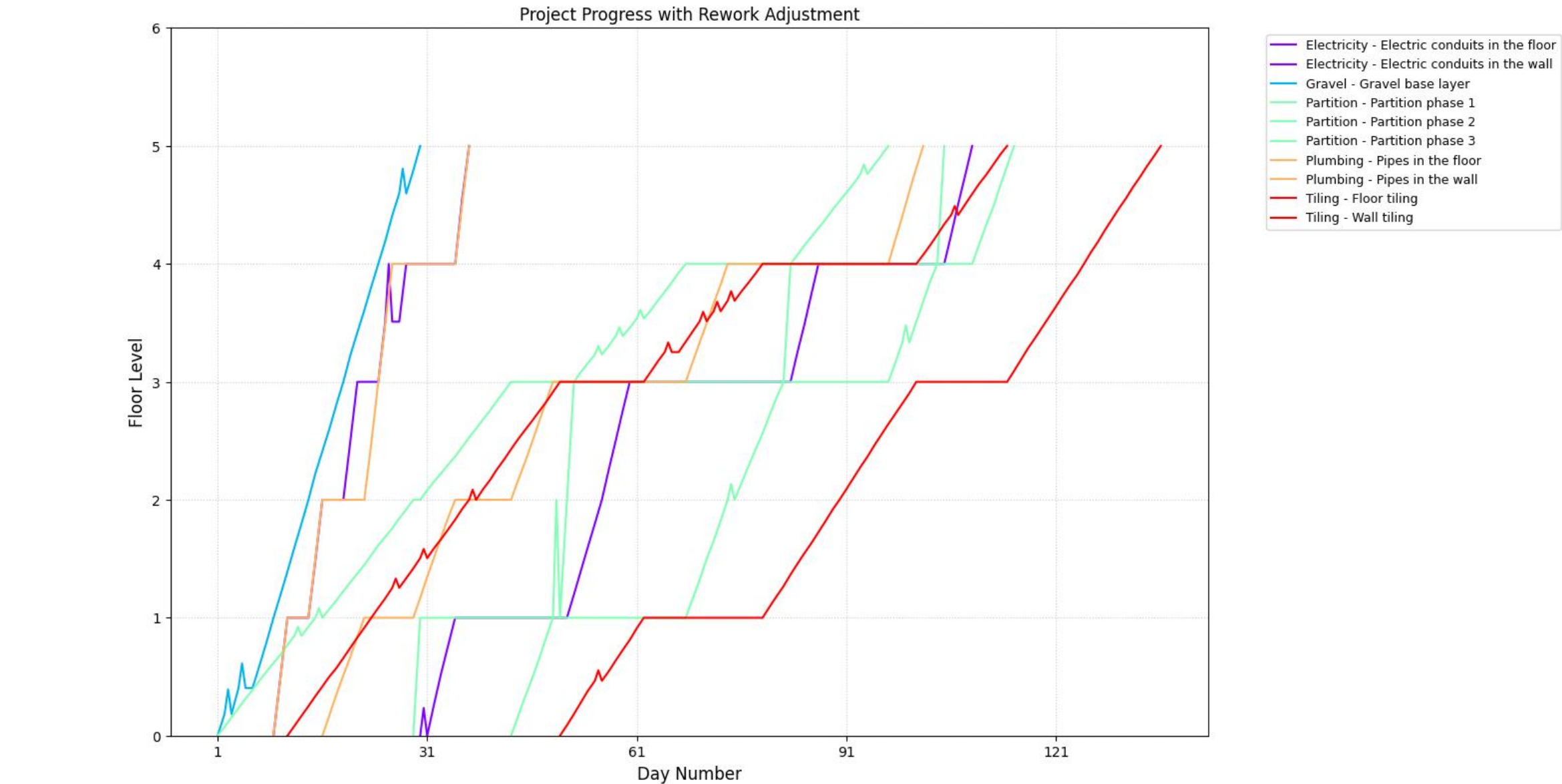
day	floor	process	trade	IQ	status	IPR	Actual efficiency	Remain work	Is rework	Today workload	Predecessor processes	Pre Remain work	Trade available	Prerequisites completed	Can start
0	1	Gravel base layer	Gravel	154	pending	34	null	154	null	null	null	null	1	TRUE	TRUE
1	1	Gravel base layer	Gravel	154	in_progress	34	32	122	FALSE	32	null	null	0	TRUE	FALSE
2	1	Gravel base layer	Gravel	154	in_progress	34	32	90	FALSE	32	null	null	0	TRUE	FALSE
3	1	Gravel base layer	Gravel	154	in_progress	34	32	58	FALSE	32	null	null	0	TRUE	FALSE
4	1	Gravel base layer	Gravel	154	in_progress	34	33	25	FALSE	33	null	null	0	TRUE	FALSE
5	1	Gravel base layer	Gravel	154	completed	34	34	0	FALSE	25	null	null	1	TRUE	FALSE

day_number	floor	process	assigned_trade	IQ	task_status	initial_production_rate	actual_efficiency	remain_work	is_rework	today_workload	pre_remain_work	trade_available	can_start
30	3	Floor tiling	Tiling	661	pending	62	null	661	null	0	0, 0	1	TRUE
31	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	62	599	FALSE	62	0, 0	0	FALSE
32	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	57	542	FALSE	57	0, 0	0	FALSE
33	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	58	484	FALSE	58	0, 0	0	FALSE
34	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	61	423	FALSE	61	0, 0	0	FALSE
35	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	0	423	TRUE	0	0, 0	0	FALSE
36	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	59	364	FALSE	59	0, 0	0	FALSE
37	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	57	307	FALSE	57	0, 0	0	FALSE
38	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	58	249	FALSE	58	0, 0	0	FALSE
39	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	67	182	FALSE	67	0, 0	0	FALSE
40	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	0	182	TRUE	0	0, 0	0	FALSE
41	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	58	124	FALSE	58	0, 0	0	FALSE
42	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	60	64	FALSE	60	0, 0	0	FALSE
43	3	Floor tiling	Tiling	661	in_progress	62	58	6	FALSE	58	0, 0	0	FALSE
44	3	Floor tiling	Tiling	661	completed	62	59	0	FALSE	6	0, 0	1	FALSE

结果展示1（无返工或扰动示意图）



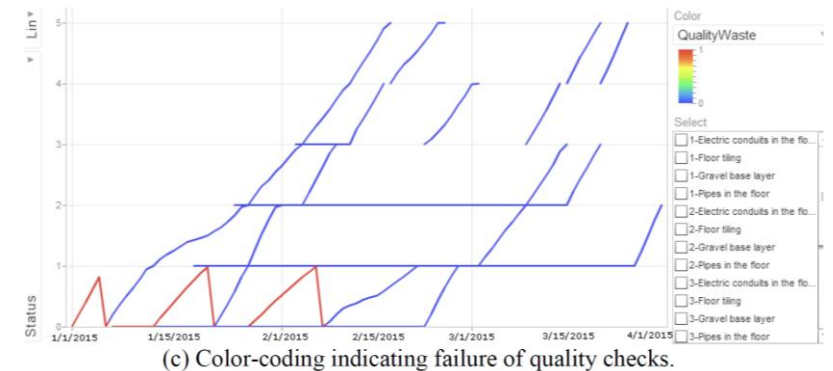
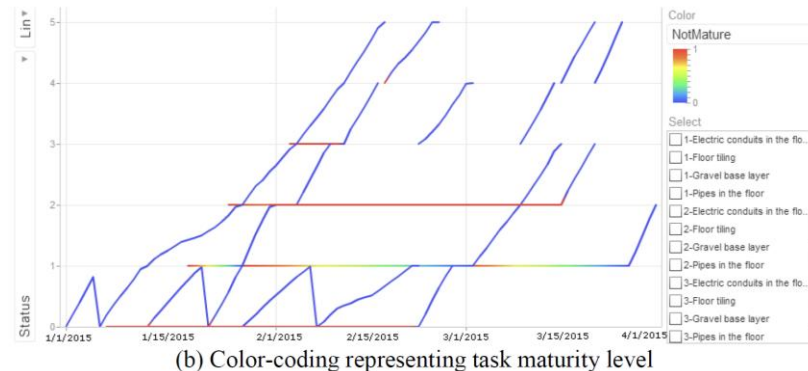
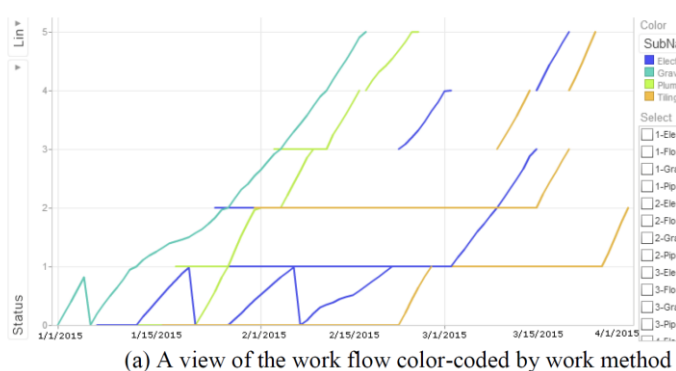
结果展示2（10%扰动+10%无效）



进一步研究1

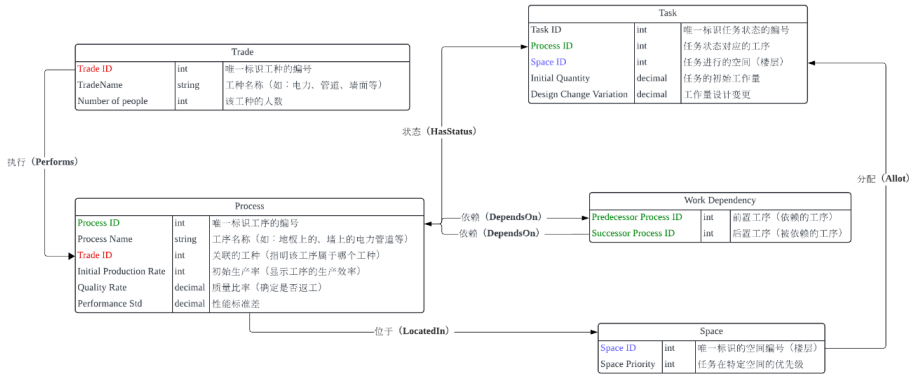
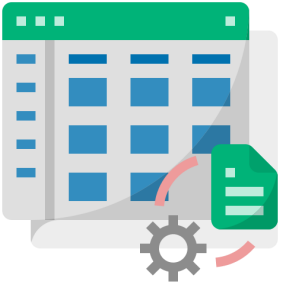
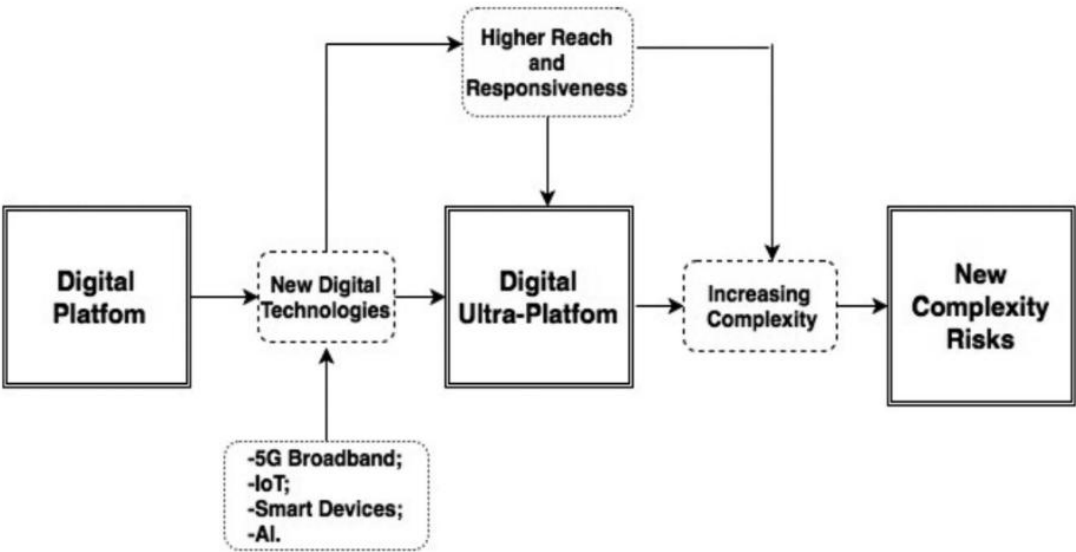
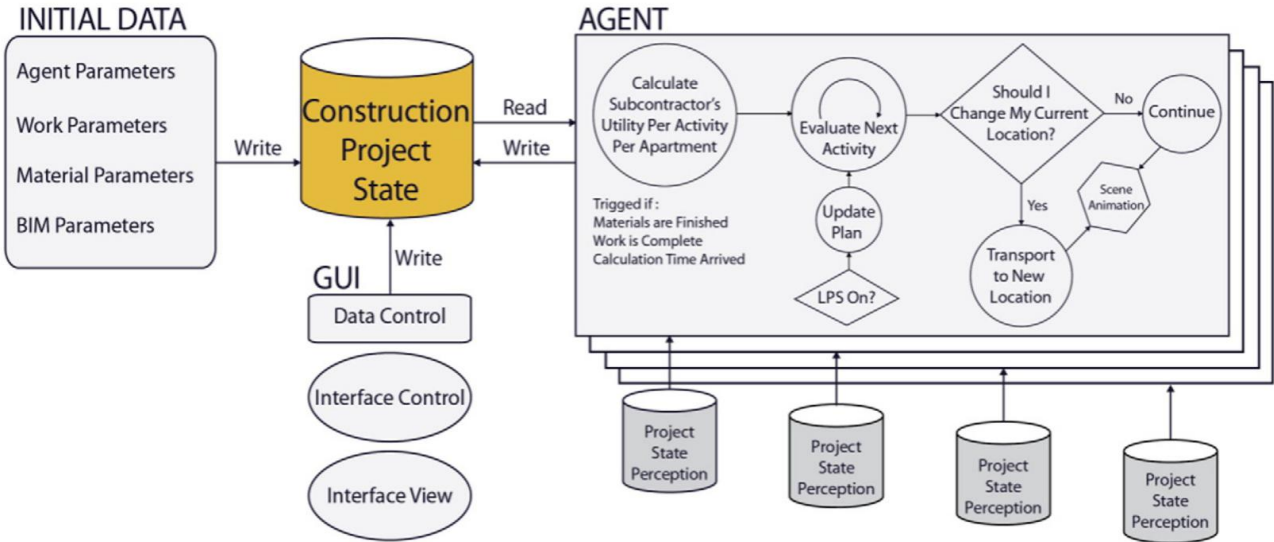
更加详细的过程模拟和过程解析...

- 施工流程表示（图）。
 - 横轴代表从 2015 年 1 月 1 日开始的时间；纵轴代表从第 1 层到第 5 层的工作空间。系统可按代理人/分包商名称（图 a）、工作方法和事件对线条进行分组和着色。例如，代理在未准备好的工作上的错误决定在该时间点用红色表示（图 b），质量检查任务的失败用红色表示（图 c）。
- 当代理进入，工作就绪时，线变为蓝色。
 - 结合这三幅图，可以对项目工作流程进行量化分析。
 - 电工本以为可以在 2015 年 1 月 7 日进行 1 楼的电工工作（图 a），直到 2015 年 1 月 15 日再次进场时才发现工作尚未成熟（图 b），原因是他的先期工作碎石基层迟迟没有完成（图 a）。
 - 砾石代理商在 2015 年 1 月 6 日（图 c）没有进行质量检查，导致他的工作延误，也影响了水管铺设和瓷砖铺设（图 a）。



进一步研究2

利用人工智能对代理人数据建模，进而模拟预测建筑行业工作人员的行为...



谢谢