

# 考虑生产效率与工艺的资源受限项目调度问题

王珩玮, 林佳瑞\*, 张建平

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 多模式资源受限项目调度问题 (MRCPSP) 是建设项目进度优化问题的重要数学模型。但该模型难以同时表征工序时长、成本与资源需求之间的多种关系。为了解决这一问题, 该文提出了一种 MRCPSP 模型, 并利用约束规划 (CP) 对算例进行了求解。该问题模型通过定义生产力函数以及各工序对各类资源总需求的组合表征工序时长、成本以及资源需求之间的关系。经验证, 该模型可以模拟施工过程中生产力变化的情况, 并允许在优化求解时考虑工艺选择对结果的影响, 相比传统的 MRCPSP, 求解结果有更明确的工程含义, 具有实际应用价值。

**关键词:** 施工进度优化; 资源受限项目调度问题 (RCPSP); 约束规划 (CP); 数学建模

**中图分类号:** TU722; TP301.6

## Resource-constrained project scheduling problem considering productivity and construction methods

WANG Hengwei, LIN Jiarui\*, ZHANG Jianping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The multimode resource-constrained project scheduling problem (MRCPSP) is an essential mathematical model for construction schedule optimization. However, it is difficult for the model to simultaneously represent multiple relationships between activity duration, cost, and resource requirements. For solving this problem, this paper proposes a new MRCPSP model and further solve the model using constraint programming (CP). The problem model represents the relationships between activity duration, cost, and resource

requirements by introducing the productivity function and the resource total requirements combinations of activities. It is proved that the new problem model can simulate the change of productivity in construction, and enable considering the influence of the construction methods selection to solution results. Compared with the traditional MRCPSP, the solution results have a more explicit engineering meaning to be able to contribute to actual projects.

**Key words:** resource-constrained project scheduling problem (RCPSP); construction schedule optimization; constraint programming (CP); mathematical modeling

建设项目中, 为了提高施工效率、减少损耗、增加利润, 项目管理人员会对进度计划与资源配置进行优化以保证项目成功进行<sup>[1]</sup>。资源受限项目调度问题 (resource-constrained project scheduling problem, RCPSP) 是实现建设项目进度与资源优化的关键数学模型<sup>[2]</sup>, 但 RCPSP 模型的基本假设中, 各工序的时长与资源配置固定, 与实际建设项目存在较大差异。因此有研究提出了多模式资源受限项目调度问题 (multimode resource-constrained project scheduling problem, MRCPSP), 其中的模式指各工序拥有的不同资源需求、成本与工序时长的组合<sup>[3]</sup>。但是如工序

收稿日期: 2019-07-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0702107); 北京市自然科学基金资助项目(8194067); 中国科协青年人才托举工程项目(QNRC2016001)

作者简介: 王珩玮 (1990—), 男, 博士研究生。

通信作者: 林佳瑞, 助理研究员, lin611@tsinghua.edu.cn

成本与资源需求的关系、工序时长与劳动力资源需求的关系等实际上并不能很好地在 MRCPSp 中进行描述。

RCPSP 属于多项式复杂程度的非确定性 (mon-deterministic polynomial, NP) 问题<sup>[4]</sup>, 也是制约这类问题复杂程度的关键原因。约束规划 (constraint programming, CP) 是建设项目 RCPSP 或 MRCPSp 的有效求解方法, 且求解速度与准确度不亚于一般启发式算法<sup>[5]</sup>, 因此有研究者在 CP 的基础上建立新的问题模型并实现求解。Liu 等<sup>[6]</sup>提出了考虑现金流约束并以最大净现金流为目标的 MRCPSp, 并使用 CP 完成了求解。Menesi 等<sup>[5]</sup>利用 CP 实现了考虑总工期与资源均衡的多目标 MRCPSp 求解。Liu 等<sup>[7]</sup>提出了考虑材料供给约束、成本约束与多种劳动力模式因素的 MRCPSp 并实现了 CP 求解。可见, 有关研究并未深入分析生产效率、工艺变化及其相互关系对问题求解的影响, 而是简单地将其抽象为一系列的组模式。

针对该问题, 本文提出同时考虑生产效率、工艺选择等因素的 MRCPSp 数学模型及其基于 CP 的问题求解方法, 进一步完善 MRCPSp 模型。最后, 通过算例验证证明所提出模型的可行性与正确性。

## 1 数学模型定义

考虑需利用 CP 求解, 因此在定义 MRCPSp 模型时需要明确变量、表达式、约束与目标函数以符合 CP 模型的要求<sup>[8]</sup>。其中, 变量指的是在指定有限值域中可任意取值的量。在一个问题中, 所有变量的值域组合构成了解空间。表达式可由变量或其他表达式通过运算组合而成。而变量属于一类特殊的表达式。约束指的是对某一表达式的限制, 如最大值与最小值约束。而目标函数指的是作为优化目标的表达式。优化目标也包括最小、最大等。

### 1.1 基本定义与约束

基本定义主要明确资源约束项目调度此类问题的基本解空间 (变量定义) 以及变量之间的基本关系。这类问题中包括 2 个关键元素: 工序与资源。其中工序有 3 个关键量: 开始时间、结束时间与时长。这 3 个量之间存在一个方程, 因此包含 2 个变量。一般而言, 可以将开始时间与时长作为变量, 而在 CP 中, 有专门适合于工序时长的变量, 即区间变量 (interval variable)。1 个区间变量的作用与 2 个数值变量对等, 包括起始点、终止点以及长度, 可分别代表一个工序  $i$  的开始时间  $S_i$ 、结束时间  $F_i$  以及

时长  $D_i$ 。2 个工序之间存在顺序关系, 一般包括 4 种<sup>[9]</sup>: 结束-开始 (FS)、结束-结束 (FF)、开始-结束 (SF) 以及开始-开始 (SS), 同时设置时间间隔的最大值与最小值, 即

$$LL \leq P_j - P_i \leq UL.$$

其中:  $P_i$  代表  $S_i$  或  $F_i$ , LL 代表最小时间间隔, UL 代表最长时间间隔。在建设项目中, 最常用的是 FS 关系, 并且设置 LL。

资源有 1 个关键量, 即各工序对该资源的需求。在 RCPSP 中, 工序对资源的需求在工序进行期间一般不会发生变化, 各工序对资源需求的累加所得到的总需求会受到资源供应的限制, 这也是这类问题中“资源受限”的由来。根据资源是否可以再生, 总需求的计算方式有所不同。对于可再生资源  $k$  如劳动力、机械设备等, 某一时刻  $t$  的总需求  $R_{kt}$  为  $t$  之前所有时刻资源需求的最大值, 即

$$R_{kt} = \max \left( \sum_{i \in DA_u} dr_{ik} \right), \quad u = 0, 1, \dots, t.$$

其中  $DA_u = \{i \mid S_i \leq u \leq F_i\}$ , 表示在时刻  $u$  正在进行的所有工序的集合。 $dr_{ik}$  表示单位时间内工序  $i$  对资源  $k$  的需求量。而对于不可再生资源如材料、一次性用品, 总需求则计算如下:

$$R_{kt} = \sum_{i \in AA_t} r_{ik}.$$

其中,  $AA_t = \{i \mid t \geq S_i\}$ , 表示在时刻  $t$  前已经开始的所有工序的集合, 而  $r_{ik}$  表示工序  $i$  对资源  $k$  的需求总量, 在工序  $i$  开始时便累加至总需求。

资源约束可以统一表达为总需求  $R_{kt}$  与总供给  $S_{kt}$  之间的关系, 即对于任意时刻  $t$ , 有

$$R_{kt} \leq S_{kt}.$$

不同类型的 RCPSP 对  $S_{kt}$ 、 $dr_{ik}$  以及  $r_{ik}$  的考虑存在差异, 甚至有的仅考虑  $dr_{ik}$  或  $r_{ik}$ , 但上述关系基本不变。

### 1.2 生产力约束

生产力约束主要用于确定  $dr_{ik}$ 。在大多数 MRCPSp 中,  $dr_{ik}$  与  $r_{ik}$  是伴随  $D_i$  直接给出的, 并且可再生资源给出  $dr_{ik}$ , 而不可再生资源给出  $r_{ik}$ 。但实际上,  $D_i$  与劳动力资源的  $dr_{ik}$  和  $r_{ik}$  之间的关系可使用函数关系表达。例如安装某一层的给水管道, 对安装工的需求为 20 人天, 即  $r_{ik} = 20$ 。假设工人的生产力不随同时施工的人数发生变化, 则  $D_i$  与  $dr_{ik}$  的组合可能为 (5, 4)、(10, 2) 等。本文提出相对生

产力  $p_{ik}$  的概念，可计算如下：

$$p_{ik} = \frac{r_{ik}}{D_i dr_{ik}}$$

$p_{ik}$  代表当前生产力与标准生产力之间比值。当  $p_{ik} = 1$  时，工序  $i$  中资源  $k$  的生产力是标准的；当  $p_{ik} > 1$  时，生产力更高；当  $p_{ik} < 1$  时，生产力更低。标准生产力一般是一个统计结果，代表最有可能的生产力。表现形式可以是一项工序单位工程量对某资源的需求，例如工程量定额。

实际生产力会受多因素影响偏离标准值<sup>[10]</sup>，甚至可能受  $dr_{ik}$  的影响。当  $dr_{ik}$  过高时，可能受作业空间的影响导致生产力降低，而  $dr_{ik}$  过低时可能由于并行程度差使生产力降低。考虑这些情况，可以采用通用的方式表达  $dr_{ik}$ 、 $D_i$  与  $r_{ik}$  之间的关系：

$$P(dr_{ik}, D_i, r_{ik}) = 0$$

其中  $P$  是本文中定义的生产力函数，可以表征工序  $i$  中资源  $k$  的实际生产力，甚至可以体现以  $D_i$  或  $dr_{ik}$  为原因的生产力变化。而通过该方程，即使对于可再生资源，也可以通过定义  $r_{ik}$  计算得到  $dr_{ik}$  从而求得  $R_{kt}$ ，进而形成资源约束方程。

### 1.3 工艺选择约束

一个工序可能可以使用多种工艺方法完成。例如一面混凝土墙的模板施工，可以使用木模板也可以使用铝模板，二者由于材料不同，因而材料处理方式也不同。不同的工艺主要在流程与材料方面存在区别。一般而言，可以将一个工序进一步分解为若干子工序以代表工艺步骤的概念<sup>[11]</sup>。但当各子工序与其他工序无关时，子工序的选择对整个项目的进度并不影响。会对项目进度造成影响的是不同工艺对资源选择的差异。

本文认为一个工序  $i$  可以在若干资源组合中选择一种。每个资源组合  $j$  中，定义了该工序对其中任意资源  $k$  的总需求  $r_{ikj}$ 。通过定义二值变量实现选择：

$$r_{ik} = \sum_j X_{ij} r_{ikj};$$

$$\sum_j X_{ij} = 1.$$

其中  $X_{ij}$  为 0 或 1，表示资源组合  $j$  是否被选择。此种定义方式与传统的 MRCPSp 之区别主要在于：1) 组合中不包括工序时长；2) 对于可再生资源不定义每日需求量。如此更符合工程逻辑。

### 1.4 目标函数

MRCPSp 的目标函数包括总工期、总成本、资源均衡指数以及一些其他的指标。本文并没有增加新的目标函数，选取了 3 个典型的目标函数用于提高算例的真实性：

1) 总工期。总工期 TD 为最大的  $F_i$ ，即

$$TD = \max(F_i).$$

2) 总成本。总成本 TC 一般可表示为直接成本与间接成本之和<sup>[12]</sup>。其中直接成本主要指资源成本，即各工序对各资源的需求与单价的乘积之和；间接成本主要指管理成本，一般可以认为与总工期成正比。因此总成本可计算如下：

$$TC = \sum_i \sum_k r_{ik} \cdot pc_k + TD \cdot dc.$$

其中， $pc_k$  是资源  $k$  的单价， $dc$  为单位时间的管理成本。

3) 资源均衡指数。资源均衡指数 RLI 一般只针对可再生资源，可计算如下：

$$RLI = \frac{\sum_r \left| \sum_{i \in DA_r} dr_{ik} - \frac{\sum_i r_{ik}}{TD} \right|}{TD}$$

该指数越小，资源需求曲线越接近平均值。

## 2 约束规划求解的实现

与利用 CP 求解建设工程 RCPSp 的大部分研究相同，本文使用 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 求解新问题模型，基于该应用程序提供的 .NET 接口开发了求解程序。具体来说，使用 ILOG Concert 命名空间中的类定义变量、表达式与目标函数，而使用 ILOG CP 命名空间中的类定义约束、变量或表达式之间的运算，最后使用 ILOG CP 作为求解器。

基本约束中，工序间顺序关系的定义使用区间变量之间的 4 类约束：EndAtStart()、EndAtEnd()、StartAtEnd()、StartAtStart()。资源约束主要是对全过程累积表达式 (cumulative function expression)  $R_k$  的约束，具体分为 2 种情况：1) 对于全过程恒定的约束，采用 Le() 即“小于等于”或 Ge() 即“大于等于”约束；2) 对于过程中会发生变化的约束，采用 AlwaysIn()。

本文提出的生产力约束是通过定义生产力函数实现的。根据具体的情况可以采用 2 种方式：1)  $dr_{ik}$  是  $D_i$  与  $r_{ik}$  的显函数时，可尝试直接用  $D_i$  与  $r_{ik}$  通过运算定义  $dr_{ik}$  为表达式；2) 生产力函数为隐函数时，

可定义  $dr_{ik}$  为变量, 并根据生产力函数为  $dr_{ik}$ 、 $D_i$  与  $r_{ik}$  建立约束。后者增加了解空间, 因此若条件允许应尽可能采用前者。

对于工艺选择约束,  $r_{ikj}$  对于具体算例是常数。首先设置二值变量  $X_{ij}$ , 利用  $X_{ij}$  和  $r_{ikj}$  建立  $r_{ik}$  的表达式, 同时建立工序  $i$  的所有  $X_{ij}$  总和为 1 的约束以保证每个工序仅选择一组资源。

### 3 算例验证

算例验证主要包括 3 个目标: 1) 证明方法的可行性; 2) 证明并明确新 MRCPS 模型中生产力函数的作用; 3) 证明并明确新 MRCPS 模型中工艺选择的作用。其中目标 1 在所有算例的求解过程中实现, 目标 2 与目标 3 需要设计针对性的算例 (算例 2 与算例 3), 同时需设计一个能够验证在求解过程中可以同时考虑这些关系的算例 (算例 4)。

为了明确求解效果, 各算例选择有代表性的一系列资源而非所有资源。并假设这些资源在施工过程中具有恒定的价格。

#### 3.1 算例 1: 基本算例

##### 1) 工序网络。

首先, 本文建立了一个示例项目, 其工序间顺序关系如图 1 所示, 形成了包含了 10 个工序的网络。大多数工序间是基本的 FS 关系, 但工序 6、7、8 与工序 10 之间存在 3d 的最短间隔, 工序 6、8 和工序 7 之间存在间隔为 0 的 SS 关系, 即这 3 个工序要求同时开始。

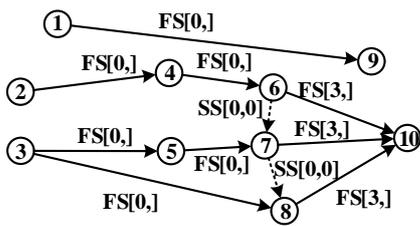


图 1 基本工序网络图

该工序网络模拟了某个施工区域装配式建筑中竖向构件的施工过程。主要包括 4 条路径: a) 工序 1→9: 该区域预制混凝土墙的安装、支撑拆除; b) 工序 2→4→6→10: 该区域现浇钢筋混凝土柱的钢筋绑扎、模板施工、混凝土浇筑与模板拆除; c) 工序 3→5→7→10: 该区域现浇钢筋混凝土墙的模板施工、钢筋绑扎、混凝土浇筑与模板拆除; d) 工序 3→8→10: 该区域现浇混凝土填充墙的模板施工、混凝土浇筑与模板拆除。

##### 2) 资源。

设置了 8 个关键资源, 如表 1 所示, 包括 4 个劳动力资源与 4 个材料资源。其中, 木模板 (N3) 在本示例项目中并不存在周转的情况, 因此考虑为不可再生资源。而为了使验证过程更有针对性, 在实际施工过程中可能会使用的其他施工资源, 例如在预制混凝土构件施工过程中所需要的支撑、塔吊等资源, 本文中并不考虑。

表 1 资源列表

资源类型	资源编号	资源名称	资源价格
可再生	R1	普工	180
	R2	钢筋工	200
	R3	木模板工	220
	R4	混凝土工	200
不可再生	N1	预制混凝土墙	600
	N2	钢筋	3 000
	N3	木模板	5
	N4	混凝土	300

##### 3) 成本。

各个资源的单价列于表 1 以计算直接成本。其中, 劳动力资源 (R1、R2、R3、R4) 单价是每人天的成本; 混凝土材料 (N1、N4) 单价是每  $m^3$  的成本; 钢筋材料 (N2) 单价是每 t 的成本; 模板材料 (N3) 单价是每  $m^2$  平均每次周转的成本。间接成本按每天 1000 计。

##### 4) 各工序对资源的总需求。

各工序对这些资源的总需求如表 2 所示。对于劳动力资源 (R1、R2、R3、R4), 总需求单位为天人, 对于混凝土材料 (N1、N4), 总需求单位为  $m^3$ , 对于钢筋材料 (N2), 总需求单位为 t, 对于模板材料 (N3), 总需求单位为  $m^2$ 。对于混凝土柱浇筑 (工序 6) 以及混凝土墙浇筑 (工序 7 和工序 8) 可以选择使用普工或混凝土工。其他工序的资源需求是固定的, 不考虑工艺选择。

##### 5) 生产力函数。

生产力函数采用标准函数 ( $p_{ik}$  恒等于 1, 即生产力恒为标准生产力):

$$P(dr_{ik}, D_i, r_{ik}) = dr_{ik} D_i - r_{ik}.$$

##### 6) 优化目标。

采用多目标优化, 首要目标为总工期最小, 次要目标是总成本最小。此后按照资源价格由大到小将可再生资源的均衡指数添加至优化目标中。

##### 7) 资源约束。

为劳动力资源设置基本约束, 如表 3 所示。

求解得总工期最短为 25 天, 此时的最小总成本为 285 690。包括工序时间安排、资源模式选择以及

资源全过程消耗的求解结果如图 2 所示。其关键路径为工序 3→5→7→10，是现浇钢筋混凝土墙的施工过程。考虑 SS 关系，工序 6、8 也属于关键工序。

表 2 基本工序资源需求表

工序编号	资源组合编号	资源编号	资源总需求
1	1-1	R1	30
		N1	20
2	2-1	R1	10
		R2	35
3	3-1	N2	10
		R1	15
4	4-1	R3	52
		N3	1 200
5	5-1	R1	4
		R3	18
6	6-1	N3	350
		R4	8
7	7-1	N4	90
		R1	15
8	8-1	N4	90
		R4	15
9	9-1	R1	160
		N4	160
10	10-1	R1	12
		N4	120
10	10-1	R1	16
		N4	120
9	9-1	R1	8
10	10-1	R1	20

表 3 资源约束（基本设置）

资源编号	R1	R2	R3	R4	N1	N2	N3	N4
约束	12	5	5	5	-	-	-	-

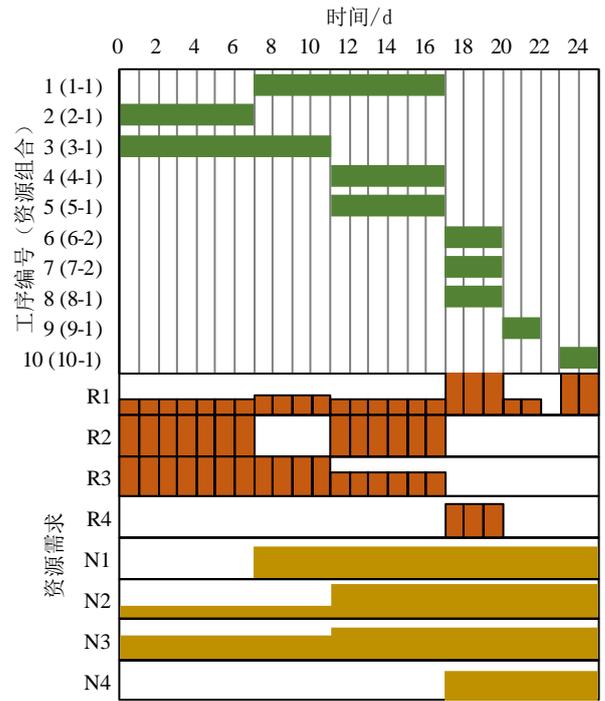


图 2 算例 1 求解结果

### 3.2 算例 2：生产力函数变化分析

为了展现生产力函数对求解结果的影响，本算例采用了下列生产力函数：

$$P(dr_{ik}, D_i, r_{ik}) = D_i \sqrt{dr_{ik}} - r_{ik}$$

该函数的特征在于：当  $dr_{ik}$  等于 1 时，生产力等于标准生产力；当  $dr_{ik}$  大于 1 时，生产力小于标准生产力，以模拟工作面拥挤导致生产力下降的情况。

除生产力函数之外，其他所有条件相对于算例 1 均不发生变化。求解得总工期最短 54 天、此时的最小总成本为 365 650，具体如图 3 所示。

相对于算例 1 的结果，各工序的由于生产力的下降，总工期提高了，并且除了由此带来的间接成本增加，增加了 29 000，因单位时间劳动力资源消耗增加，因此直接成本也有增加，增加了 50 960。同时，各工序的时长也均增加了，但关键路径并没有改变。非关键路径中，工序 1→工序 9 的时间跨度增加了，工序 2→工序 4→工序 6→工序 10 的调整空间由 4d 增加为了 5d，工序 6 不再为关键工序。而工序 8 仍属于关键工序，其由于两个 SS 关系被延后。

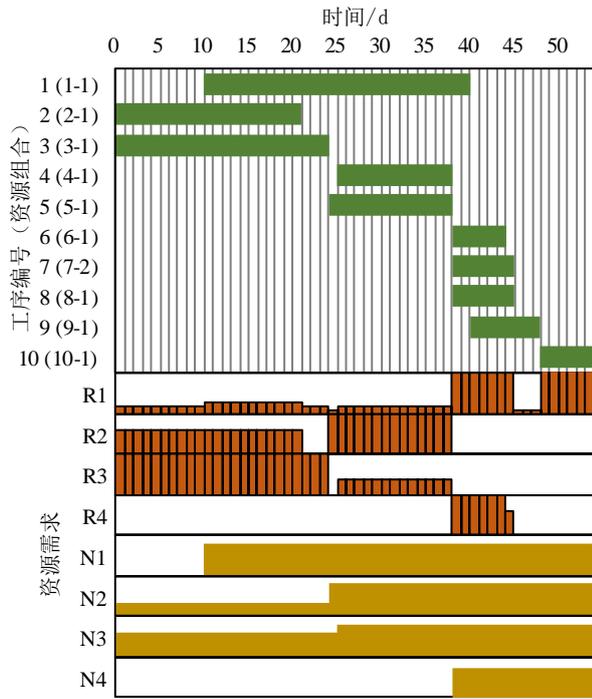


图 3 算例 2 求解结果

### 3.3 算例 3: 多工艺选择分析

为了体现多工艺选择分析的作用, 在基本配置的基础上, 本算例增加了铝模板施工所需的 2 个资源, 如表 4 所示。其中, 铝模板工 (R5) 每人天的成本为 220, 与木模板工 (R3) 相当, 但由于铝模板的重复使用次数极高, 因此考虑铝模板的单价小于木模板, 每 $\text{m}^2$ 每次周转的成本为 4。与 R3 相同, R5 设置了 5 人上限。同时, 为模板施工的工序 3 和 4 增加了铝模板工艺资源组合的选择, 如表 5 所示。相对于木模板, 铝模板由于施工效率更高<sup>[13]</sup>, 因此劳动力资源总需求更低。

表 4 铝模板资源

资源类型	资源编号	资源名称	资源价格
可再生	R5	铝模板工	250
不可再生	N5	铝模板	4

表 5 铝模板资源组合

工序编号	资源组合编号	资源编号	资源总需求
3	3-2	R1	15
		R5	40
		N5	1200
4	4-2	R1	4
		R5	12
		N5	350

相对于算例 1, 最短总工期缩短为 22d, 此时的

最小总成本为 276 640, 结果具体如图 4 所示。总工期缩短的原因是关键路径中的工序 3 选择了新增的铝模板工艺。由于对 R5 的总需求比 R3 少, 因此在资源上限相同的情况下, 工序 3 的时长缩短了 3d。而由于 N5 的单价也相对更低, 因此总成本降低的 9 050 中, 除了降低了 3 000 的间接成本, 还降低了 6 050 的直接成本。

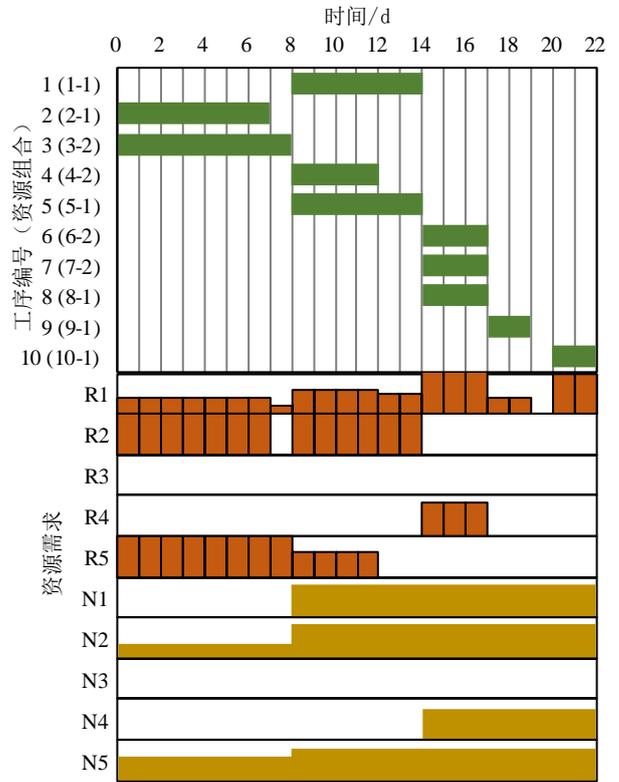


图 4 算例 3 求解结果

### 3.4 算例 4: 资源约束变更分析

为了体现资源约束下工艺选择以及生产力函数的作用, 本算例在算例 3 的基础上变更了部分资源约束:

- 1) 铝模板 (N5) 供应限制为 1 500, 可以满足工序 3, 但不能继续满足工序 4 的需求;
- 2) 普工 (R1) 的人数限制由 10 人增加至 20 人。混凝土工 (R4) 的人数限制由 5 人增加至 20 人。

求解结果为总工期 19d, 此时的最小总成本为 274 030, 具体如图 5 所示。相对于算例 3, 主要有 5 个工序发生了变化: 工序 4、6、7、8 和 10。其中由于 N5 的限制, 工序 4 由算例 3 中的铝模板工艺改为了木模板, 因此工序时长、工序位置、需要的资源类型、资源总需求量与直接成本均发生了变更。虽然因此使直接成本增加了 390, 但并未对总工期造成影响。总工期相比算例 3 缩短 3d 主要包括 2 个原因: 1) 放宽了 R1 和 R4 的限制, 通过调整工序 6 的

资源选择,并调整工序 6、7 和 8 的劳动力资源的日需求量,这 3 个工序的时长总计被压缩至 1d; 2)放宽了 R1 的限制,工序 10 的时长由 2d 缩短为 1d。因此总工期共缩短 3d。虽然该结果并未考虑工作面的影响,但表明了投入大量生产力资源有机会同时降低总工期与总成本。

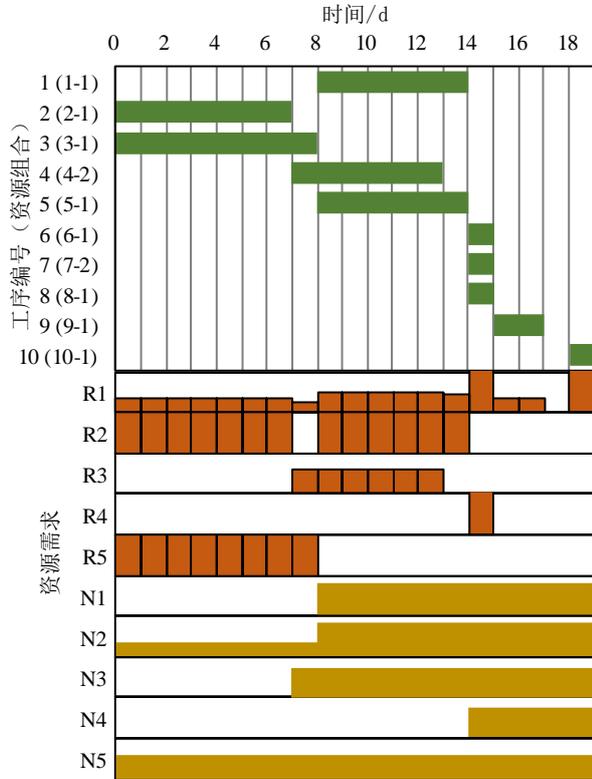


图 5 算例 4 求解结果

### 3.5 结果分析

通过对 4 类算例的求解与结果对比,本文提出的模型的可行性得到了验证,同时也证明了该模型具有如下特征:

1) 通过定义各工序的时长与劳动力资源需求的关系,可影响求解结果中的工序时长,进而影响直接成本并可能影响工序排布;

2) 可实现对工序工艺的选择,体现为工序对各资源的总需求,从而影响工序时长、工序排布、资源配置,进而影响总工期与直接成本;

3) 在有限的资源条件下,可在生产力函数的基础上,通过综合调整工序时长以及对不同类型劳动力和不同工艺所需材料组合的选择,使资源配置合理并得到总工期与总成本的最优解。

## 4 结论

本文提出的 MRCPSPP 模型比传统的 MRCPSPP 模

型增加了生产力函数并明确了对工艺选择的表达方式。经验证,该模型通过引入生产力函数,不仅可以在求解过程中考虑工序时长与劳动力资源需求的协调变化,还可考虑生产力可变的情况以尽可能模拟实际施工过程中的情况。同时,通过为各工序的不同工艺定义对应的资源组合,可在求解过程中考虑各工序的工艺选择对各总体优化目标的影响,具备实际意义。在资源限制变更时,该模型求解后可在综合考虑工序生产力函数与工艺选择的同时对求解结果进行合理调整,在实际工程中具有应用价值。

### 参考文献 (References)

- [1] GIRAN O, TEMUR R, BEKDAS G. Resource constrained project scheduling by harmony search algorithm [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(2SI): 479-487. DOI: 10.1007/s12205-017-1363-6
- [2] KASRAVI M, MAHMOUDI A, FEYLIZADEH M R. A novel algorithm for solving resource-constrained project scheduling problems: a case study [J]. *Journal of Advances in Management Research*, 2019, 16(2): 194-215. DOI: 10.1155/2015/923791
- [3] BRUCKER P, DREXL A, MOHRING R, et al. Resource-constrained project scheduling: notation, classification, models, and methods [J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 112(1): 3-41. DOI: 10.1016/s0377-2217(98)00204-5
- [4] BLAZEWCZ J, LENSTRA J K, KAN A. Scheduling subject to resource constraints - classification and complexity [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1983, 5(1): 11-24. DOI: 10.1016/0166-218x(83)90012-4
- [5] MENESI W, HEGAZY T. Multimode resource-constrained scheduling and leveling for practical-size projects [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2015, 31(6): 04014092. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000338
- [6] LIU S S, WANG C J. Resource-constrained construction project scheduling model for profit maximization considering cash flow [J]. *Automation in Construction*, 2008, 17(8): 966-974. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.04.006
- [7] LIU J, LU M. Constraint programming approach to optimizing project schedules under material logistics and crew availability constraints [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2018, 144(7): 0401804. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001507
- [8] MENESI W, GOLZARPOOR B, HEGAZY T. Fast and near-optimum schedule optimization for large-scale projects [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2013, 139(9): 1117-1124. DOI:

- 
- 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000722
- [9] ABUWARDA Z, HEGAZY T. Flexible activity relations to support optimum schedule acceleration [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2016, 142(11): 06016004. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001193
- [10] GOLNARAGHI S, ZANGENEHMADAR Z, MOSELHI O, et al. Application of artificial neural network(s) in predicting formwork labour productivity [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 5972620. DOI: 10.1155/2019/5972620
- [11] GARCIA-NIEVES J D, PONZ-TIENDA J L, SALCEDO-BERNAL A, et al. The multimode resource-constrained project scheduling problem for repetitive activities in construction projects [J]. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(8): 655-671. DOI: 10.1111/mice.12356
- [12] ABUWARDA Z, HEGAZY T. Work-package planning and schedule optimization for projects with evolving constraints [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(6): 04016022. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000587
- [13] 刘雪红, 程海寅, 陆建飞, 等. 铝合金模板体系施工技术及其效益分析[J]. *施工技术*, 2012, 41(23): 79-82.
- LIU X H, CHENG H Y, LU J F, et al. Construction technology of aluminum alloy formwork system and its benefit analysis[J]. *Construction Technology*, 2012, 41(23): 79-82. (in Chinese)