

## 工程系统进度优化的协同决策方法

佟士祺<sup>1,2</sup>, 张晋<sup>2</sup>, 党延忠<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为解决多个承包商间的项目合作伙伴选择问题, 采用多目标规划构建工程系统进度优化的协同决策模型. 以合作博弈理论为基础, 运用主要目标法设计一种基于期望收益约束选择的模型求解方法. 算例结果表明, 所提出的方法可以在保障参与协同的承包商收益需求前提下实现工程系统进度最优, 所获得的协同方案更容易为各方接受.

**关键词:** 工程计划; 进度优化; 协同决策

中图分类号: F406

文献标志码: A

## Coordination decision method for project schedule optimization

TONG Shi-qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin<sup>2</sup>, DANG Yan-zhong<sup>1</sup>, WU Di<sup>2</sup>

(1. Institute of System Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. School of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: TONG Shi-qi, E-mail: tsqx@126.com)

**Abstract:** To solve the partner selection problem among the contractors for project system schedule optimization, a coordination decision model is established by using the multi-objective programming. And a solution method based on the selection of expected profit constraint is designed by using the cooperative game theory and main object method. The result shows that the method can effectively optimize the project system schedule under the premise of guarantee about the profit demands of contractors who participate in the cooperation, and the coordination schedule can easily be accepted by all parties.

**Keywords:** project schedule; schedule optimization; coordination decision

### 0 引言

工程系统进度优化的协同决策(以下简称协同决策)是指为实现某一工程系统进度目标的优化, 在多个项目承包商之间开展的关于工程建设资源(以下简称资源)协同的合作伙伴选择活动. 理论上, 项目合作伙伴选择可以看作一类项目群进度管理问题. 目前, 在项目群进度管理研究方面已有大量研究成果, 例如: Hazir等<sup>[1]</sup>提出了一种项目进度计划的集成控制模型; Caniels等<sup>[2]</sup>利用结构方程模型对项目群环境下信息管理系统的效用进行了分析; Dalfard等<sup>[3]</sup>提出了基于模拟退火算法的项目群进度模型; Yang等<sup>[4]</sup>提出了基于云计算的制造项目群资源协同管理方法; Kazemipoor等<sup>[5]</sup>提出了一种解决项目组合进度计划问题的目标规划模型; Zheng等<sup>[6]</sup>综合考虑了项目优先级与方案的鲁棒性, 建立了多项目决策模型; 王军强等<sup>[7]</sup>针对资源受限多项目调度的多目标优化问题,

提出了依次处理项目时序约束和资源约束的两阶段分解算法; Yang等<sup>[8]</sup>为解决汽车研发过程中的项目群资源安排问题, 提出了一种基于任务优先级的多项目调度方法.

通过文献分析发现, 现有项目群进度管理方面的研究成果主要集中于单一承包商所属的多个项目之间如何开展资源的统一调度, 而关于多个承包商之间的项目合作伙伴选择问题的有关研究成果尚未见报道. 理论上, 在不同承包商之间开展的合作伙伴选择可以看作一类合作博弈问题, 协同行为能否产生将取决于不同承包商之间的合作博弈结果. 为此, 本文以合作博弈理论为基础分析了协同决策的基本原理, 构建了工程系统进度优化的协同决策模型及求解方法, 并通过算例对模型及求解方法进行了验证.

### 1 基本原理

若要说明协同决策的基本原理, 首先需要讨论资

收稿日期: 2014-05-17; 修回日期: 2014-10-21.

基金项目: 教育部博士点新教师基金项目(2012Z0289); 辽宁省博士启动基金项目(20121027).

作者简介: 佟士祺(1977—), 男, 讲师, 博士后, 从事工程管理的研究; 张晋(1991—), 男, 硕士生, 从事系统建模与仿真的研究.

源归属对协同行为的影响. 如果某一工程系统的所有项目都隶属于同一承包商, 则从工程系统最优出发对资源进行统一调度一般不会存在障碍. 但是, 在一些规模较大的工程中, 业主很多情况下会将整个工程划分为多个项目, 以合同方式委托给多个承包商分别完成. 一般情况下, 不同承包商之间的工程建设任务是彼此独立的, 不存在交叉. 如果业主希望利用多个承包商之间的资源协同实现整个工程系统进度的进一步优化, 则往往需要超出原有合同规定的任务范围, 要求某些承包商利用自身拥有的资源为另一些承包商的工程建设任务服务. 但是, 在合同规定范围内实现自身利益最大化是每个承包商在制定自身项目进度计划时追求的核心目标. 根据合作博弈理论的联盟理性前提, 若要实现不同承包商之间的资源协同, 则需要使参与协同各方的利益都有所增加, 或者至少是一方的利益增加, 而另一方的利益不受损害. 出于个体利益考虑, 只有当承包商可以从其他承包商处获得能使自身项目进度计划目标更优的资源时, 该承包商才有可能愿意主动提供自身拥有的资源为其他承包商服务, 从而产生协同行为; 否则, 该承包商一般不愿对其他承包商提供其自有资源, 协同行为也难以产生. 因此, 协同决策的基本原理在于: 利用工程建设资源的交换, 使得每个参与协同的承包商都能获得比原有独立完成项目时更优的收益, 并以此为基础实现整个工程系统进度的进一步优化.

## 2 协同决策模型

下面针对多个承包商之间的合作伙伴选择问题开展决策模型研究. 为有效降低建模的复杂程度, 提出如下限制条件:

1) 在开展协同前, 所有项目已经实现了自身进度计划最优, 即所有资源都是不可或缺的, 不存在冗余资源;

2) 只考虑不同承包商之间的资源交换;

3) 只考虑资源交换对工作工期的影响;

4) 如果利用某一项目的某种资源为另一项目服务, 则该项目也必须从其他项目中获得该资源的替代资源, 否则该项目无法执行;

5) 工作的工期只与其所利用资源的种类相关, 暂不考虑资源用量变化对工期的影响.

从以上限制条件出发, 构建协同决策模型如下:

1) 目标函数. 设工程的项目集合  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ . 以工期尽可能提前为目标, 协同决策模型的目标函数可将系统优化目标和局部优化目标划分为两类, 即

$$\text{Min } T^c(P_w) = \text{Max } T_n^c(E), \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (1)$$

$$\text{Min } T_n^c(E), \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (2)$$

式(1)为协同决策的系统优化目标, 代表业主希望使所有项目全部完成的时刻尽可能提前,  $P_w$  为  $P$  中元素个数大于1的子集, 代表选择的合作伙伴; 式(2)为协同决策的局部优化目标, 代表每个承包商均希望协同方案能使各自项目的结束时刻尽可能提前.

2) 约束条件. 模型中, 除要考虑每个项目自身的工期约束和逻辑约束之外, 还需要考虑因资源交换而产生的协同约束条件. 从限制条件出发, 协同约束条件主要为不同项目的工作因资源交换而产生的工期约束(以下简称为协同工期约束). 设存在  $N$  个工作  $(i, j)_1, (i, j)_2, \dots, (i, j)_N$ , 分别隶属于  $p_1, p_2, \dots, p_N$ .  $(i, j)_1, (i, j)_2, \dots, (i, j)_N$  分别拥有资源  $R_{ij}^1, R_{ij}^2, \dots, R_{ij}^N$ , 这些资源可以在  $(i, j)_1, (i, j)_2, \dots, (i, j)_N$  之间进行交换, 则协同问题可转化为  $N$  种资源在  $N$  个工作上的全排列问题. 设  $t(i, j)_{nm} (n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, N)$  为工作  $(i, j)_n$  在选择使用资源  $R_{ij}^m$  时的计划工期, 则工作  $(i, j)_n$  的协同工期约束为

$$t(i, j)_n = \sum_{i=1}^m x(i, j)_{nm} t(i, j)_{nm},$$

$$\sum_{i=1}^m x(i, j)_{nm} = 1, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (3)$$

其中工作  $(i, j)_n$  在选择使用资源  $R_{ij}^m$  时,  $x(i, j)_{nm} = 1$ , 否则  $x(i, j)_{nm} = 0$ .

除协同工期约束之外, 模型还存在一个联盟理性约束, 即在协同时每个项目获得的最差结果是维持原计划不变, 不参与协同. 在联盟理性约束下, 应保证协同后每个项目的完成时刻  $T_n^c(E)$  不晚于原定计划的完成时刻  $T_n(E)$ , 否则协同方案不可行. 相应的公式为

$$T_n^c(E) \leq T_n(E), \quad n \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (4)$$

## 3 模型求解

分析可知, 协同决策模型的优化应以式(1)为目标, 合理利用式(2)在  $N$  个承包商之中选择恰当的合作伙伴开展协同, 以实现整个工程系统的进度最优. 实践中, 业主和承包商一般均希望能够找到符合合作博弈联盟理性假设的协同方案. 此类方案的特点如下: 由某些项目构成可以开展协同的联盟, 在联盟内部的项目之间开展协同, 而联盟之外的项目维持原计划不变; 联盟内部制定的协同方案既能满足所有成员的收益预期, 又能使整个工程系统目标实现最优. 根据上述特点, 本文利用主要目标法设计一种基于期望收益约束选择的模型求解方法, 具体步骤如下.

Step 1: 由承包商  $C_n$  设置  $p_n$  的进度目标期望  $T_n^*(E)$ . 若  $T_n^c(E) \leq T_n^*(E)$ , 则认为  $C_n$  对协同方案是满意的, 同意采用该方案; 否则, 认为  $C_n$  是不满意的,

将维持原有资源使用方案不变。

Step 2: 在  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  中寻找所有元素数量大于1的子集  $P_w$ , 构成  $P$  的幂集  $\{P\} = \{P_1, P_2, \dots, P_W\}$ , 其中  $W = 2^N - N - 1$ 。

Step 3: 任取  $P_w \in \{P\}$ , 在此不妨设  $P_w$  是由  $P$  中前  $V (V < N)$  个项目组成的; 以式 (1) 为主要目标, 并利用  $T_n^*(E)$  将式 (2) 转化为约束条件, 则模型的目标函数转化为

$$\text{Min Max}(T_n^c(E)) = f(P_w), n \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (5)$$

其中

$$T_n^c(E) \leq T_n^*(E), p_n \in P_w, P_w = \{p_1, p_2, \dots, p_V\}. \quad (6)$$

Step 4: 利用式 (3) 计算协同方案的工期, 并采用 CPM 法计算  $T_n^c(E)$ . 如果存在协同方案  $\{p_1^c, p_2^c, \dots, p_V^c\}$  满足式 (6), 则称  $P_w$  为可行的稳定联盟 (以下简称稳定联盟). 若找不到稳定联盟, 则转入 Step 6; 若找到稳定联盟, 则转入 Step 5.

Step 5: 将  $P$  中所有不属于  $P_w$  的元素加入  $P_w$ , 构成  $P^c = \{\{p_1^c, p_2^c, \dots, p_V^c\}, p_{V+1}, \dots, p_N\}$ , 并称  $P^c$  为关于稳定联盟  $P_w$  的稳定解 (以下简称稳定解). 利用式 (5) 对联盟  $P_w$  中所有稳定解进行比较, 选择联盟内部的最优值作为稳定联盟  $P_w$  的最优协同方案.

Step 6: 对  $\{P\}$  中所有元素重复 Step 3 ~ Step 5. 如果遍历所有元素后仍找不到稳定解, 则所有项目维持原计划  $P$  不变, 计算结束; 如果存在稳定解, 则转入 Step 7.

Step 7: 利用式 (5) 对 Step 6 中找出的所有稳定联

盟  $P_w$  的最优协同方案进行比较, 找出其中的最优方案作为最终的协同方案, 计算结束.

### 4 算例研究

下面通过一个算例对本文提出的模型及求解方法进行验证. 工程  $P$  包含 3 个承包商分别承担的并行项目  $p_1$ 、 $p_2$  和  $p_3$ , 所有项目的最早开始时刻相同, 每个项目原定的进度计划如图 1 所示. 经调查, 3 个项目之间存在可以互换的资源, 相应的协同工期约束如表 1 所示 (算例中所有工序进度的计算单位为“月”, 下同). 为加快工程进度, 业主希望各承包商之间可以进行资源交换, 通过协同的方式使整个工程的总工期尽可能提前. 下面利用以上方法对算例进行优化.

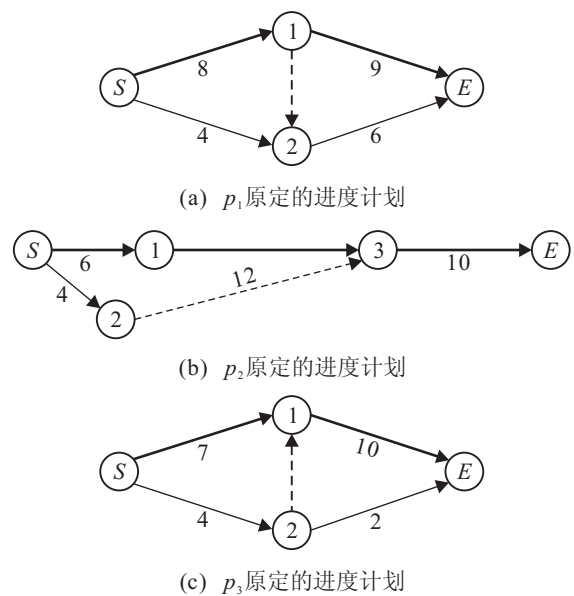


图 1 原定的进度计划

表 1 协同工期约束

$(i, j)_n$	$t(i, j)_{nm}$								
	$R_{S_1}^1$	$R_{S_1}^2$	$R_{S_2}^3$	$R_{2E}^1$	$R_{13}^2$	$R_{1E}^3$	$R_{22}^2$	$R_{S_1}^3$	
$(S, 1)_1$	8	6	4	-	-	-	-	-	-
$(S, 1)_2$	8	6	4	-	-	-	-	-	-
$(S, 2)_3$	8	6	4	-	-	-	-	-	-
$(2, E)_1$	-	-	-	6	12	10	-	-	-
$(1, 3)_2$	-	-	-	6	12	10	-	-	-
$(1, E)_3$	-	-	-	6	12	10	-	-	-
$(S, 2)_2$	-	-	-	-	-	-	4	7	
$(S, 1)_3$	-	-	-	-	-	-	4	7	

1) 协商中, 每个承包商均提出如下要求: 如果参与了协同, 则各自项目至少要提前 1 个月完成; 否则, 将维持原有资源使用方案不变, 不参与协同. 首先利用 CPM 法计算图 1 中 3 个项目的工期, 再根据承包商的要求构建约束条件如下:

$$T_1^c(E) \leq 16, T_2^c(E) \leq 27, T_n^c(E) \leq 16. \quad (7)$$

2) 工程共包含 3 个项目, 共存在 4 种可能的联盟

方式, 因此  $P$  的幂集为

$$\{P\} = \{(p_1, p_2), (p_1, p_3), (p_2, p_3), (p_1, p_2, p_3)\}.$$

3) 对  $\{P\}$  中的每个元素分别构建形如式 (5) 的优化目标函数, 在表 1 中找出可能的协同方案, 再利用 CPM 法计算能使式 (5) 达到最优的稳定解, 计算结果如表 2 所示.

表 2 可行的协同方案

联盟	$(i, j)_n$	$R_{i_j}^n$	$t(i, j)_n$	$T_1^c(E)$	$T_2^c(E)$	$T_3^c(E)$
$p_2^c, p_3^c$	$(S, 1)_2$	$R_{S_2}^3$	4	17	26	16
	$(S, 2)_3$	$R_{S_1}^2$	6			
	$(1, 3)_2$	$R_{1_3}^2$	12			
	$(1, E)_3$	$R_{1_E}^3$	10			
	$(S, 2)_2$	$R_{S_1}^3$	7			
	$(S, 1)_3$	$R_{S_2}^2$	4			
$p_1^c, p_3^c$	$(S, 1)_1$	$R_{S_3}^3$	4	14	28	14
	$(S, 2)_3$	$R_{S_1}^2$	8			
	$(2, E)_1$	$R_{2_E}^3$	10			
	$(1, E)_3$	$R_{1_E}^1$	6			

4) 由表 2 可知, 从系统优化目标出发, 协同方案  $(p_2^c, p_3^c)$  明显优于协同方案  $(p_1^c, p_3^c)$ , 因此可选择方案  $(p_2^c, p_3^c)$  作为最终的协同方案, 协同后的 3 个项目的进度计划如图 2 所示. 由图 2 可知, 整个工程的系统进度提前了 2 个月, 参与协同的两个项目  $p_2$  和  $p_3$  的进度计划分别提前了 2 个月和 1 个月,  $p_1$  则仍维持原计划不变.

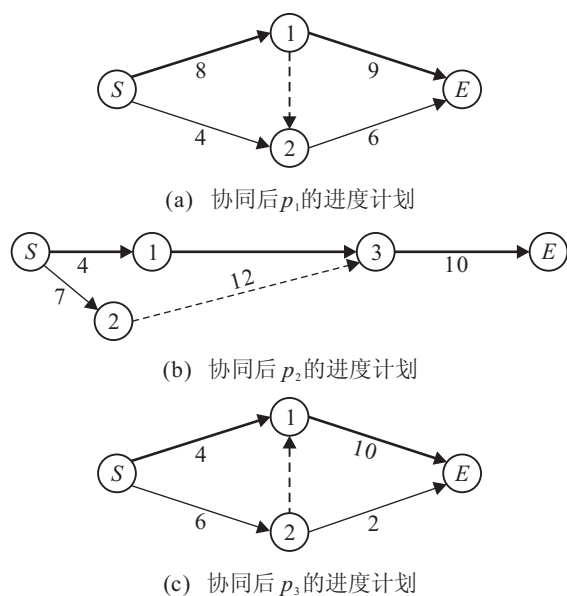


图 2 协同后的进度计划

## 5 结 论

综上所述, 解决协同决策问题的关键在于协同方案能否使每个参与协同的承包商获得满意的更优收益. 从这一角度出发, 本文运用多目标规划构建了协同决策模型, 并设计了一种基于收益期望约束选择的模型求解方法. 算例结果显示, 模型及求解方法可以

在有效保障承包商利益需求的前提下对整个工程进行系统进度优化, 并获得更具可操作性协同方案. 文中所阐述的建模及优化思想不仅可以直接用于解决工程进度管理中的合作伙伴选择问题, 而且对其他管理领域中类似问题也同样具有借鉴意义, 因而具有广泛的应用前景.

## 参考文献(References)

- [1] Hazir O, Schmidt K W. An integrated scheduling and control model for multi-mode projects[J]. Flexible Services and Manufacturing J, 2012, 25(2): 230-254.
- [2] Caniels M, Bakens R. The effects of project management information systems on decision making in a multi project environment[J]. Int J of Project Management, 2012, 30(2): 162-175.
- [3] Dalfard V, Ranjbar V. Multi-project scheduling with resource constraints & priority rules by the use of simulated annealing algorithm[J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2012, 19(3): 493-499.
- [4] Yang F Y, Shi Z Y. Resources cooperative management in multi-project manufacturing based on cloud[C]. The 3rd Int Asia Conf on Industrial Engineering and Management Innovation. Beijing: IEEE Press, 2012: 41-48.
- [5] Kazemipoor H, Tavakk R, Shahnazari P, et al. A differential evolution algorithm to solve multi-skilled project portfolio scheduling problems[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(5): 1099-1111.
- [6] Zheng Z, Lin S M, Guo Z, et al. Resource-constraint multi-project scheduling with priorities and uncertain activity durations[J]. Int J of Computational Intelligence Systems, 2013, 6(3): 530-547.
- [7] 王军强, 张松飞, 陈剑, 等. 一种求解资源受限多项目调度问题的分解算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 83-95.  
(Wang J Q, Zhang S F, Chen J, et al. Decomposition algorithm for resource-constrained multi-project scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1): 83-95.)
- [8] Yang S L, Fu L. Critical chain and evidence reasoning applied to multi-project resource schedule in automobile RD process[J]. Int J of Project Management, 2014, 32(1): 166-177.

(责任编辑: 曹洪武)