

# NCRPE 约束下项目群误期损害费用 两阶段非线性优化模型研究

解春艳<sup>1</sup>, 丰慧<sup>1</sup>, 丁娟<sup>2</sup>, 颜雅琦<sup>2</sup>

(1. 南京工程学院管理工程学院, 江苏 南京, 211167; 2. 河海大学商学院, 江苏 南京, 211100)

**摘要:**如何针对多主体下合同项目延误与项目群误期损害费用之间的非线性关系, 优化并控制 NCRPE 约束下项目群误期损害费用是业主关注的问题。本研究首先从理论与实践两个角度分析了多主体下项目群误期损害费用计算结果的不足; 其次分析了 NCRPE 约束下项目群误期损害费用的非线性特点; 再次构建了项目群实施前第一阶段 NCRPE 均衡优化模型; 最后采用离散马尔可夫过程来刻画项目群中合同项目的状态并据此计算项目群误期损害费用非线性概率, 以因合同项目随机性使项目群误期损害费用最小化为优化目标, 构建了项目群实施过程中第二阶段项目群误期损害费用非线性优化模型并说明了不同情境下的求解方法。研究结果表明, 项目群误期损害费用非线性优化效果要优于线性优化效果, 构建的模型在现行规则下, 能有效地降低因合同项目随机性给业主造成的误期损害费用。研究成果为开展多主体下项目群误期损害费用优化、制定相应的项目群误期损害费用管理规则提供了依据。

**关键词:**项目群; 合同项目; 甲供非商品化资源; 非线性; 多主体

**中图分类号:**F224.33

## 一、文献综述

项目群是大型项目组织实施的基本单元, 其目的是实现“1+1>2”的效果。在有限资源约束下, 项目群实施效果的重要性逐渐凸显, 已成为亟待解决的关键问题之一<sup>[1]</sup>。在合同环境下, 一个大型项目通常需要分为若干个标段(即合同项目), 分别由不同的承包商(主体)承担。这些合同项目之间既存在工艺逻辑关系, 也存在组织逻辑关系。此时, 项目群具有组成复杂、主体众多、不确定性、交互作用显著等特点, 一旦合同项目工期发生延误, 将有可能引发项目群中其他合同项目工期和项目群工期的延误, 从而产生项目群误期损害费用<sup>[2]</sup>。考虑到项目群的多主体性和合同项目之间的关联性, 项目群误期损害风险的防控尤为重要。多主体合同环境下项目群误期损害是近年来多项目管理领域的研究热点, 项目群误期损害是其主要研究问题之一<sup>[3]</sup>。从实践角度分析, 现行实践(FIDIC<sup>[4]</sup>、建设

工程施工合同<sup>[5]</sup>、建设工程项目总承包合同<sup>[6]</sup>等示范文本)只适用于单主体环境, 缺少多主体下合同项目延误损害赔偿管理的实践(比如合同条款等), 这给多主体下项目群业主和承包商的项目群误期损害管理造成很大的困扰。随着项目群中合同项目参数的不确定性、合同项目之间的级联效应、多主体之间的利益冲突等因素的叠加, 项目群误期损害费用问题变得更加紧迫、复杂和困难, 也因此受到学界和实践的高度关注<sup>[7]</sup>。

与单项目费用优化相比, 项目群费用优化需要考虑不同主体之间的交互作用和级联效应。现有相关研究包括基于子网络和关键链对项目群工期—费用优化<sup>[3]</sup>, 项目群管理中分散式资源约束下的费用优化<sup>[8]</sup>, 多种甲供非商品化资源(Non-Commercial Resources Provided by Employer, NCRPE)约束下项目群工期和误期成本的双目标优化<sup>[9]</sup>等。在开展项目群费用优化过程中, 现有文献通常认为项目群中合同项目延误时间与项目群误期损害费

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2024-10-17

基金项目: 江苏省社会科学基金项目“‘双碳’目标下数字赋能江苏水生态协同治理路径与机制研究”(23GLD006); 南京工程学院引进人才科研启动基金项目“多方协同下长江水生态治理龙头企业特殊社会责任实现的合作机制与对策研究”(YKJ202321)

作者简介: 解春艳, 博士, 讲师, 研究方向为项目管理。

通信作者: 丰慧, 博士, 讲师, 研究方向为项目型企业管理。

E-mail: huifeng@njit.edu.cn

引文格式: 解春艳, 丰慧, 丁娟, 颜雅琦. NCRPE 约束下项目群误期损害费用两阶段非线性优化模型研究[J]. 南京工程学院学报(社会科学版), 2024, 24(4): 68-78.

用之间呈线性关系,即合同项目延误时间与项目群误期损害费用两者之间成正比<sup>[3,10-11]</sup>。但是这与实际情况并不吻合,这是因为项目群中不同合同项目的自由时差和总时差、误期发生时刻等均不同。这些差异使得合同项目延误时间与项目群误期损害费用两者之间并非简单的线性关系,而是非线性关系。研究表明,单项目下绿色施工活动费用、质量、环保水平、安全指数与持续时间之间存在非线性关系<sup>[12]</sup>,项目时间与成本之间存在非线性关系<sup>[13]</sup>,系统要素之间存在长期、动态的强关联性<sup>[14]</sup>,项目群工期提前与奖励之间存在非线性关系<sup>[15]</sup>,项目成本和时间绩效指标与监测活动之间存在非线性关系<sup>[16]</sup>,项目的总成本与时间之间呈现出先下降后上升的非线性关系<sup>[17-18]</sup>。

对于地处偏远或远离材料集中供应地或运输成本过大的项目群,NCRPE 的模式应运而生。NCRPE 需要在项目群现场或附近,通过建设 NCRPE 生产厂,在项目群现场生产人工材料<sup>[19]</sup>。从项目群费用组成角度来看,NCRPE 费用占项目群总费用的比例较大,它是项目群费用控制的重要因素。以混凝土为例,斯里兰卡莫拉加坎德水电项目中,人工骨料(砂石料)成本占混凝土成本的比例高达 52.25%;喀麦隆洛姆潘加尔水电项目中,这一比例也达到了 19.34%<sup>[19]</sup>;三峡大坝混凝土为  $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,人工砂石料费用占混凝土成本的 28.60%。与商品化资源(水泥、钢材、人力资源<sup>[20-22]</sup>等)约束相比,NCRPE 的约束条件更为苛刻、要求更为严格<sup>[3]</sup>,这是因为 NCRPE 的最大供应强度在项目群实施前就已确定,项目群实施过程中,NCRPE 的最大供应强度一般不能增大<sup>[3]</sup>,即 NCRPE 的生产规模是固定的。同时,NCRPE 生产的不均衡性进一步加剧了问题的复杂性。

综上所述,现有实践与理论成果为项目群误期损害费用非线性优化研究奠定了良好的基础,但回顾现有文献可知,现有研究仍存在两个问题:一是从实践角度分析,有关项目群误期损害管理的现行规则是针对单一主体而提出的,难以满足多主体下项目群误期损害管理的实际需求;二是从理论角度分析,有关项目目标非线性优化方面的研究文献较少,基本都是针对单项目(单主体)而开展的,且这些研究没有考虑 NCRPE 约束下多主体之间的级联效应、导致项目群误期损害费用的非线性影响因素(比如误期发生的时间、NCRPE 不均衡程度、发生误期时刻之后的累积合同金额等)以及项目群误期损害责任的承担者等。

本文的创新点如下:(1)从多主体角度出发,拓展了多项目误期损害管理理论,解决了现行误期损害管理理论没有考虑对后续合同项目影响的问题;(2)揭示了合同项目工期随机性给项目群及 NCRPE 均衡带来的非线性影响原理;(3)构建了项目群误期损害费用优化模型,解决了在现行规则下,通过降低随机性给项目群误期损害带来的不利影响,从而减小项目群误期损害费用增加幅度的问题。

## 二、问题界定与项目群误期损害费用非线性分析

### (一)问题界定

本文拟解决的关键问题如下:

(1)在项目群实施前,如何通过 NCRPE 的均衡优化,实现 NCRPE 生产规模最小化(即 NCRPE 最大需求强度最小化)?

(2)如何实现合同项目延误给其紧后和后续合同项目最早开始(完成)时间造成的非线性不利影响程度最小化,即索赔费用和工期压缩费用最小化?

(3)如何明确因合同项目延误造成的索赔费用和工期压缩费用的责任主体?

项目群中任何一个合同项目一旦偏离计划,有可能给其他合同项目和项目群工期带来不利的影响,并且这种不利影响具有级联效应。合同项目随机性给项目群带来的不利影响包括两部分:第一部分为给合同项目自身带来的不利影响;第二部分为给其他合同项目、项目群工期和 NCRPE 均衡性造成的不利影响。项目群中的合同项目发生延误会引发一系列蝴蝶效应。处理索赔问题的难点在于业主应如何向工期延误合同项目责任单位进行索赔以及相邻合同项目责任单位如何向业主进行索赔。造成索赔问题处理较为困难的原因有两个:

(1)目前,针对多主体下合同项目延误损害赔偿管理的理论与合同条款尚不完备。现行理论和实践(FIDIC、建设工程施工合同文本等)只适用于单主体,并不适用于项目群这种多主体。例如,FIDIC 合同示范文本第 47 款、建设工程施工合同示范文本 7.5 款等对第二部分不利影响的承担问题作了规定,即承包商只承担其自身合同项目延误的不利影响,而没有规定第二部分不利影响的承担主体。

(2)合同项目工期随机性带来的影响是非线性的。合同项目随机性给其他合同项目和项目群带来的不利影响以及 NCRPE 削峰带来的不利影响呈现出非线性关系,而不是线性关系。

(二)项目群误期损害费用非线性分析

合同项目延误给其紧后和后续合同项目、里程碑工期和项目群工期造成的损失,因压缩、顺延紧后和后续合同项目所增加的费用与时间之间是非线性关系,而不是线性关系。

(1)合同项目给其他合同项目(包括里程碑项目)及项目群工期造成的损失与时间之间存在非线性关系。延误发生时刻越靠近合同项目的开始时间或完工日期,则合同项目随机性对其他合同项目的影响程度越大;反之,延误发生时刻越远离合同项目开始时间或完工日期,则合同项目随机性对其他合同项目的影响程度越小。

(2)合同项目随机性导致其他紧后合同项目开工时间的顺延以及要求紧后和后续合同项目压缩其工期而增加的费用与时间之间也存在非线性关系。同理,压缩时刻越接近合同项目的开始时间或完工日期,每压缩单位时间所增加的费用越大;反之,每压缩单位时间所增加的费用越小。

(3)合同项目延误导致 NCRPE 实际需求强度大于最大供应强度。此时,通过扩大 NCRPE 生产规模来提升最大供应强度较为困难,需要对 NCRPE 进行削峰。而削峰有可能给其他合同项目的最早开始时间和最早完成时间带来不利的影响,而这种影响是非线性的。

由上述三个方面分析可知,合同项目延误所增加的费用与时间存在非线性关系。

三、项目群误期损害费用两阶段非线性优化模型的构建

项目群误期损害费用优化模型构建分为项目群实施前和项目群实施过程两个阶段。

(1)项目群实施前误期损害费用优化思路。在项目群实施前,本研究以合同项目开始时间、完成时间为决策变量,以 NCRPE 均衡为优化目标,开展项目群误期损害费用优化,构建相应的模型。

(2)项目群实施过程项目群误期损害费用优化思路。在项目群实施过程中,本研究在项目群误期损害赔偿管理的现行规则下,降低因合同项目随机性给紧后和后续合同项目和 NCRPE 削峰所带来的不利影响,以合同项目开始时间、完成时间为决策变量,以不利影响给业主增加的费用为优化目标并考虑项目群误期损害费用的非线性关系,构建项目群误期损害费用非线性优化模型。

(一)假设条件

(1)在项目群实施前,所有合同项目业主一次

招标完成,并与中标者(承包商)签订合同;

(2)NCRPE 总量保持不变,且 NCRPE 最大需求强度不大于 NCRPE 最大供应强度;

(3)项目群工期固定;

(4)不考虑资金的时间价值;

(5)项目群实施过程中,项目合同不发生变更。

(二)参数设定

相关参数含义见表 1。

表 1 相关参数含义

| 符号                        | 含义                                            |
|---------------------------|-----------------------------------------------|
| $NCRPE_{t,smax}$          | 项目群 NCRPE 最大供应强度                              |
| $NCRPE_{t,max}$           | 项目群 NCRPE 最大需求强度                              |
| $FF_Z$                    | 合同项目 Z 的自由时差                                  |
| $TY_Z$                    | 合同项目 Z 的总时差                                   |
| $TF_Z$                    | 合同项目 Z 的延误时差                                  |
| $ES_i$                    | 合同项目 i 的最早开始时间                                |
| $EF_i$                    | 合同项目 i 的最早结束时间                                |
| $LS_i$                    | 合同项目 i 的最迟开始时间                                |
| $LF_i$                    | 合同项目 i 的最迟结束时间                                |
| $TF_i$                    | 合同项目 i 的总时差                                   |
| $FF_i$                    | 合同项目 i 的自由时差                                  |
| $k$                       | 第 t 时刻计划实施的合同项目数量                             |
| $NCRPE_{it}$              | 第 t 时刻第 i 个合同项目 NCRPE 需求量                     |
| $\sum_{i=1}^k NCRPE_{it}$ | 第 t 时刻 NCRPE 总需求量                             |
| $T$                       | 项目群工期                                         |
| $pf_{sp}$                 | 因合同项目 r 延误给紧后和后续合同项目最早开始时间造成误期,即承包商向业主提出的索赔费用 |
| $pf_{ys}$                 | 合同项目 r 延误给紧后和后续合同项目最早完成时间造成误期,即因压缩工期增加的费用     |
| $PF_r$                    | 因合同项目 r 延误带来的损失,即某承包商误期给项目群带来的误期损失            |
| $\alpha_j$                | 第 j 个合同项目承包商索赔费率                              |
| $p_j$                     | 第 j 个合同项目费用概率                                 |
| $\Delta t_{sj}$           | 第 j 个合同项目承包商的索赔时间                             |
| $\Delta t_{yj}$           | 第 j 个合同项目工期压缩时间                               |
| $\beta_j$                 | 第 j 个合同项目工期压缩费率                               |
| $T'$                      | 里程碑工期                                         |
| $ST_j$                    | 第 j 个合同项目的开始时间                                |
| $ST_i$                    | 第 i 个合同项目的开始时间                                |
| $TT_{NCRPE}$              | NCRPE 总需求量                                    |

### (三) 项目群误期损害费用非线性的概率

计划评审技术(Program Evaluation and Review Technique, PERT)一般用于表达和评审项目中各项活动的进度以及它们之间的相互关系。在此基础上,我们可以分析网络和估计时间。因此,计划评审技术是对各项工作进行合理安排、统筹规划以及严密控制以完成既定目标的一种计划与控制方法。

目前,PERT 模型已广泛应用于单项目进度管理,并能计算单项目的延误概率和完工风险。但尚未有研究将 PERT 应用于多主体下项目群进度管理。由于项目群涉及多个主体,因此需要对 PERT 模型进行修正,以满足计算和分析合同项目延误对紧后和后续合同项目最早开始时间和最早完成时间等所造成的不利影响的需要。

本文采用离散马尔可夫过程来刻画项目群中合同项目的状态<sup>[23-24]</sup>。用  $X_i$  表示第  $i$  个合同的状态,  $X_i = 1$  表示合同项目  $i$  按时完成,  $X_i = 0$  表示合同项目  $i$  延误。由此,  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  形成马尔可夫链,其状态空间为  $\{\text{延误}(0), \text{按时完成}(1)\}$ , 即  $\{X_n, (n = 0, 1, 2, \dots)\}$  是一个随机过程,状态空间  $I = \{0, 1\}$ , 且当  $X_i = i (i \in I)$  为已知时,  $X_{n+1}$  所处状态的概率分布只与  $X_n = i$  有关,而与时刻  $n$  以前所处的状态无关。对项目群而言,这意味着第  $n+1$  个合同项目仅与当前第  $n$  个合同项目有关,而与前  $n-1$  个合同项目的状态无关。此时,一步转移概率矩阵可以记为  $\begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix}$ , 式中,  $p_{i0} + p_{i1} = 1, i = 0, 1; p_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i), i, j = 0, 1$ 。用  $X_i = 1$  表示合同项目  $i$  按时完成,  $X_i = 0$  表示合同项目  $i$  延误,则合同项目  $i$  按时完成的分布可以用  $T_i | X_i = 1$  来表示,且其服从  $N(\mu_i, \sigma_i^2)$  的正态分布。

由  $E(T_i) = E(T_i | X_i = 1)P(X_i = 1) + E(T_i | X_i = 0)P(X_i = 0)$  可得,合同项目  $i$  按时完成概率为:

$$P(X_i = 1) = P(X_i = 1 | X_{i-1} = 1)P(X_{i-1} = 1) + P(X_i = 1 | X_{i-1} = 0)P(X_{i-1} = 0) \quad (1)$$

即:

$$P(X_i = 1) = p_{11}P(X_{i-1} = 1) + p_{01}P(X_{i-1} = 0) \quad (2)$$

相应地,项目群中合同项目  $i$  延误的概率为:

$$P(X_i = 0) = 1 - P(X_i = 1) = p_{10}P(X_{i-1} = 1) + p_{00}P(X_{i-1} = 0) \quad (3)$$

根据递推式(1)~式(3),当给定初始合同项

目 1 的按时完成概率  $P(X_1 = 1)$  及延误概率  $P(X_1 = 0)$ , 可以计算出合同项目 2 的按时完成或延误的概率。以此类推,可以计算得到合同项目  $i$  发生延误对紧后和后续合同项目的累积影响程度。

### (四) 第一阶段优化模型:项目群实施前 NCRPE 费用优化模型

在项目群实施之前,业主按照每个合同项目的合理工期、资源情况、项目群要求工期等,安排项目群初始网络。在 NCRPE 约束下,项目群初始网络并不能确保 NCRPE 最大需求强度的最小化。此时,本文以合同项目开始时间、完成时间为决策变量,以 NCRPE 最大需求强度最小化为优化目标,以项目群工期、NCRPE 总量等为约束条件,构建项目群实施前 NCRPE 费用优化模型。

#### 1. 决策(优化)变量

项目群实施前 NCRPE 费用优化模型的决策变量包括合同项目开始时间和完成时间。

(1) 合同项目  $i$  的最早开始时间  $ES_i$ 。当合同项目发生延误时,其紧后和后续合同项目的最早开始时间允许调整。

(2) 合同项目  $i$  的最早完成时间  $EF_i$ 。当合同项目发生延误时,其紧后和后续合同项目的最早完成时间允许调整。

#### 2. 优化目标

项目群实施前 NCRPE 费用优化目标为最小化  $NCRPE_{t, \max}$ :

$$\text{Min} NCRPE_{t, \max} = \text{Max} \left( \sum_{i=1}^k NCRPE_{li}, \dots, \sum_{i=1}^k NCRPE_{ti}, \dots, \sum_{i=1}^k NCRPE_{Ti} \right) \quad (4)$$

#### 3. 约束条件

项目群实施前 NCRPE 费用优化约束条件:项目群  $T$  不变、NCRPE 总需求量不变、逻辑关系不变。

(1) 项目群工期约束。项目群工期固定不变:

$$\sum_{i=1}^n t \leq T, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

(2) 项目群 NCRPE 总需求量  $(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^k NCRPE_{ti})$  不变:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^k NCRPE_{ti} \leq TT_{NCRPE} \quad (6)$$

(3) 项目群中合同项目之间的逻辑关系不变:

$$ST_j - ST_i \geq d_i, i \in P_j \quad (7)$$

### (五) 第二阶段优化模型:项目群实施过程误期损害费用优化模型

项目群实施过程如果一切均按照项目群计划执行,则保持项目群实施前 NCRPE 优化后的计划;如果不确定性发生并导致合同项目发生延误,此时,构建项目群误期损害费用优化模型并确保项目群误期损害费用最小。

#### 1. 决策(优化)变量

项目群实施过程中项目群误期损害费用优化模型构建的决策变量包括合同项目开始时间和完成时间,与第一阶段优化模型相同。

#### 2. 优化目标

设置优化目标需要考虑因合同项目给紧后和后续合同项目的最早开始时间和最早完成时间带来不利影响而引起的费用增加,体现在两个方面:一是紧后和后续承包商向业主索赔;二是紧后和后续合同项目工期压缩而增加的费用。此时,误期损害费用反映在两个方面:一是给紧后和后续合同项目最早开始时间带来不利影响而增加的费用,即紧后和后续承包商向业主索赔的费用( $pf_{sp}$ );二是紧后和后续合同项目工期压缩而增加的费用( $pf_{ys}$ )。由此得到优化目标:

$$PF_r = pf_{sp} + pf_{ys} = \sum_{j=1}^m (pf_{spj} \alpha_j p_j \Delta t_{sj}) + \sum_{j=1}^n (pf_{ysj} \beta_j p_j \Delta t_{sj}) \quad (8)$$

#### 3. 约束条件

(1) 里程碑工期约束。里程碑工期固定不变:

$$\sum_{i=1}^m t \leq T', i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

(2) 项目群工期约束。项目群工期固定不变,同式(5)。

(3) 项目群 NCRPE 总需求量同式(6)。

(4) 项目群中各合同项目之间的逻辑关系不变,同式(7)。

### (六) 模型求解

进度计划分为控制性和实施性进度计划。其中,项目群属于控制性进度计划,以月为单位,项目群工期延误时间比较有限,可以采用枚举法对模型进行求解。当合同项目组成较为复杂且可供选择的组合方案难以枚举,可以采用遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等通过迭代以寻找最优解。

## 四、案例分析

### (一) 案例背景及参数

(1) 案例基本情况。某大型工程项目群 Y(简称 Y)分为 16 个标段,业主采用一次性招标方式分别与 16 个承包商签订合同。16 个合同项目为柴沂挡洪闸新建工程、西段中泓开挖工程、枢纽加固改建工程(1)、枢纽加固改建工程(2)、南偏泓河道扩挖工程(1)、东南偏泓工程(1)、东南偏泓工程(2)、南偏泓河道扩挖工程(2)、南偏泓工程(1)、北偏泓工程(1)、东北偏泓扩挖工程、南偏泓工程(2)、北偏泓工程(2)、河道扩挖工程(2)、河道扩挖工程(1)、江南工程等,其编号分别为 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L、M、N、P、Q。Y 所处地区偏远,其所需的人工砂石料(即 NCRPE)无法从市场上购买,为了保证实现项目群整体效益,由业主通过建设人工砂石料生产系统来提供 NCRPE。

(2) 案例网络及其参数。Y 的初始网络计划见图 1。Y 的基本信息和资源需求量见表 2。

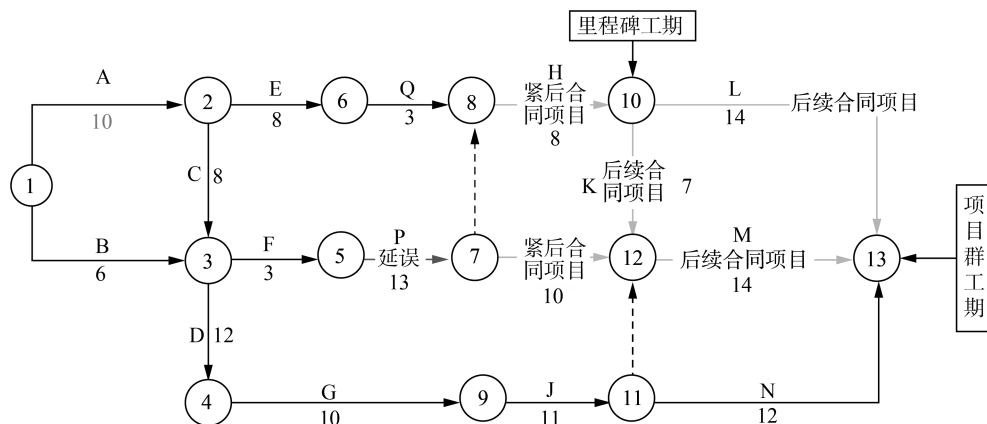


图 1 Y 的初始网络计划

表 2 Y 的基本信息和资源需求量

| 序号 | 合同项目编号 | 持续时间/月 | NCRPE 需求量<br>$r_i(t)/(\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{月}^{-1})$ | 最早开始<br>时间/月 | 最迟开始<br>时间/月 | 最早完成<br>时间/月 | 最迟完成<br>时间/月 | 总时差<br>(自由时差)/月 | 合同金额/<br>万元 |
|----|--------|--------|---------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-------------|
| 1  | A      | 10     | 1.0                                                                 | 0            | 0            | 10           | 10           | 0(0)            | 4 506.00    |
| 2  | B      | 6      | —                                                                   | 0            | 12           | 6            | 18           | 12(12)          | 3 405.00    |
| 3  | C      | 8      | 0.6                                                                 | 10           | 10           | 18           | 18           | 0(0)            | 2 925.00    |
| 4  | D      | 12     | 1.3                                                                 | 18           | 18           | 30           | 30           | 0(0)            | 2 835.00    |
| 5  | E      | 8      | —                                                                   | 10           | 25           | 18           | 33           | 15(0)           | 5 267.00    |
| 6  | F      | 3      | 0.9                                                                 | 18           | 20           | 21           | 23           | 2(0)            | 2 639.00    |
| 7  | G      | 10     | 1.1                                                                 | 30           | 30           | 40           | 40           | 0(0)            | 4 131.00    |
| 8  | P      | 13     | —                                                                   | 21           | 23           | 34           | 36           | 2(0)            | 9 858.00    |
| 9  | Q      | 3      | 1.2                                                                 | 18           | 33           | 21           | 36           | 15(13)          | 2 452.00    |
| 10 | I      | 10     | 1.0                                                                 | 34           | 41           | 44           | 51           | 7(7)            | 4 587.00    |
| 11 | J      | 11     | 1.2                                                                 | 40           | 40           | 51           | 51           | 0(0)            | 7 247.00    |
| 12 | H      | 8      | —                                                                   | 34           | 36           | 42           | 44           | 2(0)            | 3 295.00    |
| 13 | K      | 7      | —                                                                   | 42           | 44           | 49           | 51           | 2(2)            | 7 634.00    |
| 14 | L      | 14     | 1.5                                                                 | 42           | 51           | 56           | 65           | 9(9)            | 6 129.00    |
| 15 | M      | 14     | 0.8                                                                 | 51           | 51           | 65           | 65           | 0(0)            | 7 046.00    |
| 16 | N      | 12     | —                                                                   | 51           | 53           | 63           | 65           | 2(2)            | 4 638.00    |

如表 2 所示,Y 共有 16 个主体,对应 16 个合同项目,其中 A、C、D、F、G、I、J、L、M、Q 等 10 个合同项目需要 NCRPE,其余 6 个合同项目不需要 NCRPE。因合同项目延误给其他合同项目造成的损失与相应的延误时间存在非线性关系。

(3)根据工程实践经验,误期损害赔偿费率(索赔费率)  $\alpha$  取 21%/月,工期压缩费用率  $\beta$  取 24%/月。

(二)第一阶段优化:Y 实施前 NCRPE 费用优化

在 Y 实施前,业主需要承担两项费用:一是各合同项目的金额;二是 NCRPE 费用。由于在 Y 实施前,业主与各个合同项目的承包商签订了合同,因此,各个合同金额是固定不变的。而 NCRPE 费用取决于 NCRPE 生产系统的规模,即在总量不变条件下,NCRPE 生产系统规模越大,NCRPE 费用越高;反之,NCRPE 生产系统规模越小,NCRPE 费用越小。为此,在 Y 实施前,优化目标是如何减小 NCRPE 生产系统规模,以达到优化 NCRPE 费用的目的。

(1)初始双代号网络下 Y 的参数。经过计算,初始双代号网络计划下,Y 的工期为 65 个月,其关键线路为 A→C→D→G→J→M,NCRPE 最大需求强度为  $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{月}$ 。

(2)NCRPE 均衡优化后 Y 的参数。Y 的初始双代号时标网络并不能保证 NCRPE 是最均衡的,

需要对 NCRPE 开展均衡优化。按照本文模型,对 Y 的 NCRPE 进行项目群实施前均衡优化的优化结果如下:Y 工期为 65 个月,关键线路没有发生变化。与初始双代号时标网络相比,NCRPE 最大需求强度由  $3.4 \times 10^5 \text{ 万 m}^3/\text{月}$  降为  $2.7 \times 10^5 \text{ 万 m}^3/\text{月}$ ,下降了 20.59%,这意味着 NCRPE 生产系统规模和相应的费用下降了 20.59%。

(3)NCRPE 生产规模(最大供应强度)的确定。假设 NCRPE 生产规模与建造费用、运维费用之间成正比,那么,经优化后,NCRPE 生产系统的建造费用和运维费用下降了 20.59%。Y 的 NCRPE 的生产规模确定为  $2.7 \times 10^5 \text{ 万 m}^3/\text{月}$ ,即 NCRPE 最大供应强度为  $2.7 \times 10^5 \text{ 万 m}^3/\text{月}$ 。

(三)第二阶段优化:Y 项目群实施过程中误期损害费用优化

按照 Y 实施前的优化结果实施 Y,实施状态分为两种情况:

(1)如果一切按照 Y 计划实施,则不需要开展 Y 误期损害费用优化,即保持 Y 实施前的状态。

(2)如果 Y 中合同项目发生延误,则需要开展 Y 误期损害费用优化。

为了说明研究的普适性和对比分析的需要,假设合同项目 P 发生延误,延误时间分别取 2 个月、4 个月,分别代表合同项目 P 的延误时间小于等于总时差和大于总时差两种典型情况。

### 1. 当合同项目 P 延误时,项目群误期损害费用分析

当合同项目 P 延误时,业主可能需要支付 4 笔费用:一是合同金额;二是 NCRPE 费用;三是紧后和后续合同项目最早开始时间受到影响而向业主提出的索赔费用;四是紧后和后续合同项目工期受到影响而向业主提出的工期压缩费用。这 4 项费用中,在不考虑合同项目变更和资金时间价值的情况下,第一项(合同金额)不会发生变化,而第二项费用(NCRPE)在 Y 实施前已确定最大供应强度,只要 NCRPE 总量不变,NCRPE 费用也不会发生变化。因此,项目群 Y 实施过程中误期损害费用优化只需要考虑合同项目索赔费用和工期压缩费用。

#### 2. 实施过程中合同项目延误概率

根据 Y 实施前均衡优化结果,计算 P 的紧后合同项目及后续合同项目的延误概率,结果见表 3。

表 3 P 的紧后和后续合同项目的延误概率

| 条目             | 合同项目                   | 延误概率/% |
|----------------|------------------------|--------|
| P 的紧后合同项目的延误概率 | $P(X_H = 0   X_P = 0)$ | 84.731 |
|                | $P(X_I = 0   X_P = 0)$ | 78.165 |
|                | $P(X_L = 0   X_P = 0)$ | 39.835 |
| P 的后续合同项目的延误概率 | $P(X_K = 0   X_P = 0)$ | 49.220 |
|                | $P(X_M = 0   X_P = 0)$ | 44.291 |

### 3. 当 P 延误时间为 2 个月时,项目群误期损害费用非线性优化

在 Y 实施过程中,因 P 工期的随机性,导致 P 延误 2 个月。根据 Y 误期损害费用非线性优化模型,开展 Y 误期损害费用优化,结果如下:

(1) P 延误损害费用金额 ( $PF_{YW}$ )。P 延误给其自身带来的项目群误期损害费用金额为:

$PF_{YW} = P$  的合同金额  $\times$  误期损害赔偿费率 ( $\alpha_P$ )  $\times$  误期时长 =  $9\,858.00 \times 21\% \times 2 = 414.04$ (万元)。

(2) 因 P 延误造成 Y 增加的索赔费用 ( $PF_{SP}$ )。由于 P 的自由时差为 0,因此,当 P 发生 2 个月的延误时,对紧后和后续合同项目最早开始时间的影响:H、I 最早开始时间均延误 2 个月,而 L、K、M 不会发生延误。则因 P 延误造成 Y 增加的索赔费用:

$$PF_{SP} = \sum_{j=1}^m (pf_{SPj} \times \alpha_j \times p_j \times \Delta t_j) = pf_{SPH} \times \alpha_H \times p_H \times \Delta t_H + pf_{SPI} \times \alpha_I \times p_I \times \Delta t_I + pf_{YSL} \times \alpha_L \times p_L \times \Delta t_L = 3\,295.00 \times 21\% \times 0.847\,31 \times 2 + 4\,587.00 \times 21\% \times$$

$$0.781\,65 \times 2 = 267.85 \text{ (万元)}。$$

(3) 因 P 延误造成 Y 增加的工期压缩费用 ( $PF_{YS}$ )。P 的总时差为 2 个月,此时,P 发生 2 个月的延误不会对项目群工期产生影响。在 Y 工期固定的情况下,不需要压缩相关合同项目的工期。而由于里程碑工期的约束,H 需要进行为期 2 个月的工期压缩。则因 P 延误造成 Y 增加的工期压缩费用:

$$PF_{YS} = pf_{SPH} \times \beta_H \times p_H \times \Delta t_H = 3\,295.00 \times 24\% \times 2 \times 0.847\,31 = 134.01 \text{ (万元)}。$$

(4) Y 误期损害费用。因 P 延误 2 个月造成 Y 业主增加的索赔费用和工期压缩费用 ( $PF_r$ ):

$$PF_r = PF_{SP} + PF_{YS} = 267.848 + 134.011 = 401.86 \text{ (万元)}。$$

4. 当 P 延误时间为 4 个月时,项目群误期损害费用非线性优化

此时的计算原理和计算方法与上述相同,结果如下:

(1) P 延误损害赔偿金额 ( $PF_{YW}$ )。P 延误给其自身带来的项目群误期损害赔偿金额为:

$$PF_{YW} = P \text{ 的合同金额} \times \text{误期损害赔偿费率} (\alpha_P) \times \text{延误时长} = 9\,858.00 \times 21\% \times 4 = 828.07 \text{ (万元)}。$$

(2) 因 P 延误造成项目群 Y 增加的索赔费用 ( $PF_{SP}$ )。由于 P 的自由时差为 0,因此,当 P 发生 4 个月的延误时,对紧后和后续合同项目最早开始时间的影响:H、I 最早开始时间均延误 4 个月,K 最早开始时间延误 2 个月。则因 P 延误造成项目群 Y 增加的索赔费用:

$$PF_{SP} = \sum_{j=1}^m (pf_{SPj} \times \alpha_j \times p_j \times \Delta t_j) = pf_{SPH} \times \alpha_H \times p_H \times \Delta t_H + pf_{SPI} \times \alpha_I \times p_I \times \Delta t_I + pf_{YSL} \times \alpha_L \times p_L \times \Delta t_L + pf_{SPK} \times \alpha_K \times p_K \times \Delta t_K = 3\,295.00 \times 21\% \times 0.847\,31 \times 4 + 4\,587.00 \times 21\% \times 0.781\,65 \times 4 + 7\,634.00 \times 21\% \times 0.492\,20 \times 2 = 693.51 \text{ (万元)}。$$

(3) 因 P 延误造成项目群 Y 增加的工期压缩费用 ( $PF_{YS}$ )。P 的总时差为 2 个月,此时,P 发生 4 个月的延误会对项目群工期产生影响,在项目群 Y 工期固定的情况下,需要对相关合同项目的工期进行压缩。结合里程碑工期约束及合同项目工期压缩限制,对 H 进行为期 2 个月的压缩。则因 P 延误造成项目群 Y 增加的工期压缩费用:

$$PF_{YS} = \sum_{j=1}^n (pf_{YSj} \times \beta_j \times p_j \times \Delta t_j) = pf_{YSH} \times \alpha_H \times p_H \times \Delta t_H = 3\,295.00 \times 24\% \times 0.847\,31 \times 2 = 134.01 \text{ (万元)}。$$

综上所述,因 P 延误 4 个月造成项目群 Y 增加的索赔费用和工期压缩费用 ( $PF_r$ ):

$$PF_r = PF_{SP} + PF_{YS} = 693.508 + 134.011 = 827.52(\text{万元}).$$

(四) 优化结果对比分析与结果解释

下文对 P 延误时间分别取 2 个月和 4 个月两种典型情况,展开对比分析和解释。

1. Y 实施前 NCRPE 费用优化结果对比分析

通过两次均衡优化,NCRPE 最大需求强度由  $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{月}$  降为  $2.7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{月}$ ,下降了 20.59%,这意味着 NCRPE 生产系统规模和相应的建造费用下降了 20.59%。

结果解释:利用本文模型,优化后 NCRPE 更加均衡,有效地降低了 NCRPE 最大需求强度,缩小了 NCRPE 生产系统规模,达到了优化 NCRPE 费用的目的。

2. Y 实施过程(P 延误 2 和 4 个月)误期损害费用优化结果对比分析

根据 Y 实施前的均衡优化,P 发生 2 个月的延误时,其紧后合同项目 H、I 及后续合同项目 K 的最早开始时间会受到延误影响。计算可得项目群 Y 误

期损害费用最小值为  $PF_r = pf_{SP} + pf_{YS} = 3\,295.00 \times 21\% \times 0.847\,31 \times 2 + 4\,587.00 \times 21\% \times 0.781\,65 \times 2 + 7\,634.00 \times 21\% \times 0.492\,20 \times 2 + 0 = 578.84(\text{万元})$ 。

根据 Y 实施前的均衡优化,当 P 发生 4 个月的延误时,其紧后合同项目 H、I 及后续合同项目 K 的最早开始时间会受到延误影响。计算可得 Y 误期损害费用最小值为  $PF_r = pf_{SP} + pf_{YS} = 3\,295.00 \times 21\% \times 0.847\,31 \times 4 + 4\,587.00 \times 21\% \times 0.781\,65 \times 4 + 7\,634.00 \times 21\% \times 0.492\,20 \times 4 + 7\,046.00 \times 21\% \times 0.442\,91 \times 2 + 0 = 922.21(\text{万元})$ 。

项目群 Y 误期损害费用非线性优化结果对比(P 延误时间 2 个月、4 个月)见表 4。

由表 4 可知,通过对比 Y 优化前和优化后的结果,在保证 NCRPE 最大需求量不变的前提下,P 延误 2 个月时因某合同项目延误导致的业主支付费用降低 30.58%且 Y 里程碑工期与项目群工期均未受到影响。P 延误 4 个月时因某合同项目延误导致的业主支付费用降低 10.27%。由此可见,在 Y 工期不变和 NCRPE 约束下,合同项目延误时间越多,项目群误期损害费用非线性优化幅度越小。

表 4 项目群 Y 误期损害费用非线性优化结果对比(P 延误时间 2 个月、4 个月)

| 延误时间 | 事项          | 优化前                                                              | 优化后                                                                    | 对比                               |
|------|-------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 2 个月 | 项目群合同项目延误情况 | H、K、I 开始时间均延误 2 个月;里程碑工期延误 2 个月                                  | H、I 开始时间均延误 2 个月;因采取压缩措施,里程碑工期不会受到影响                                   | 延误项目数量减少且里程碑工期不会受影响              |
|      | 项目群工期       | 65 个月(项目群工期没有延误)                                                 | 65 个月                                                                  | 项目群工期维持原定工期                      |
|      | 延误损害费用      | 578.84 万元                                                        | 401.86 万元                                                              | 业主支付费用降低 30.58%                  |
| 4 个月 | 项目群合同项目延误情况 | H、I、K 开始时间均延误 4 个月,合同项目 M 开始时间延误 2 个月;里程碑工期延误 4 个月,且项目群工期延误 2 个月 | 合同项目 H、I 开始时间均延误 2 个月,K 开始时间延误 2 个月;因采取压缩措施且合同项目的工期压缩时间有限,里程碑工期延误 2 个月 | 延误项目数量减少;项目群工期不会受影响且里程碑工期受影响程度减少 |
|      | 项目群工期       | 67 个月(项目群工期延误 2 个月)                                              | 65 个月                                                                  | 项目群工期维持原定工期                      |
|      | 延误损害费用      | 922.21 万元                                                        | 827.52 万元                                                              | 业主支付费用降低 10.27%                  |

结果解释:本文构建的模型能够使 NCRPE 更加均衡,有效地降低了 NCRPE 最大需求强度,缩小了 NCRPE 生产系统规模,从而达到了优化项目群误期损害费用的目的。但是随着合同项目延误时间的增加,索赔、工期压缩费用也随之增加,业主优化费用降低幅度也随之下降,即优化效果越不显著。

3. Y 实施过程中非线性关系和线性关系下项目群误期损害费用优化结果对比分析

线性关系下项目群误期损害费用优化结果。经过优化计算,线性关系下项目群误期损害费用为 1 599.28 万元。

非线性关系下项目群误期损害费用优化结果。经过优化计算,非线性关系下项目群误期损害费用

为 827.52 万元。

项目群实施过程中非线性关系和线性关系下项目群误期损害费用优化结果对比分析见表 5。

表 5 Y 实施过程中非线性关系和线性关系下项目群误期损害费用优化结果对比(P 误期 4 个月)

万元

| 序号 | 对比项   | 项目群误期损害费用优化结果 |
|----|-------|---------------|
| 1  | 线性关系  | 1 599.28      |
| 2  | 非线性关系 | 827.52        |

结果解释:线性和非线性两种情况下项目群误期损害费用结果呈现出差异性的原因是现行规则按照线性关系(不考虑合同项目延误概率等因素)计算,而本文模型考虑了 P 延误发生的时间、NCRPE 不均衡程度、P 后面的累积合同金额等因素对项目群带来的非线性不利影响。

4. 项目群实施过程中基于现行规则和本文模型的项目群误期损害费用优化结果对比分析

按照现行规则,因承包商合同责任或风险导致 P 延误的,承包商只需要承担项目群误期损害赔偿金 414.04 万元,而业主需要向其他承包商支付违约金(索赔费用和工期压缩费用)401.86 万元,因业主合同责任或风险导致 P 延误的,业主要承担 815.90 万元。按照本文模型,因承包商合同责任或

风险导致 P 延误的,承包商需要承担 815.90 万元,因业主合同责任或风险导致 P 延误的,业主要承担 815.90 万元。

由此可见,本文模型符合风险分摊原则。同时,按照现行规则,P 延误时间 2 个月与其紧后合同项目(H、I)和后续合同项目(L、K、M)延误时间之间不存在关系,但是为了便于比较,假设单主体下 P 的紧后和后续合同项目延误时间与多主体下延误时间相同。

在 Y 实施过程中,基于现行规则和本文模型的项目群误期损害费用优化结果对比分析见表 6。

结果解释:现行规则不符合风险分摊原则,即 P 承包商风险或合同责任导致延误的几乎所有风险由业主承担,而本文模型则符合风险分摊原则,因 P 承包商风险或风险责任给项目群带来的所有损失应由 P 承包商承担。当然,如果是因非 P 承包商风险或合同责任导致 P 延误的,则所有误期损害赔偿金额均由业主承担。同时,本文模型能够将延误的合同项目与其紧后和后续合同项目延误时间两者紧密关联起来,据此可以评估合同项目延误给项目群带来的总体不利影响,而按照现行规则,合同项目的延误时间与其紧后和后续合同项目的延误时间没有关系,这使得实践中无法评估合同项目延误给项目群带来的总体影响。

表 6 Y 实施过程中基于现行规则和本文模型的项目群误期损害费用优化结果对比分析

万元

| 序号 | 对比项    | 承包商承担费用    | 业主承担费用          | 费用合计            |         |
|----|--------|------------|-----------------|-----------------|---------|
| 1  | 基于现行规则 | 承包商合同责任或风险 | 414. 04         | 401. 86         | 815. 90 |
|    |        | 业主合同责任或风险  | —               | 414. 04+401. 86 | 815. 90 |
| 2  | 基于本文模型 | 承包商合同责任风险  | 414. 04+401. 86 | —               | 815. 90 |
|    |        | 业主合同责任风险   | —               | 414. 04+401. 86 | 815. 90 |

注:(1)P 延误 2 个月。(2)假设单主体下 P 的紧后和后续合同项目延误时间与多主体下延误时间相同。

5. 基于 P 不同延误程度的 Y 误期损害费用优化结果对比分析

下文分析 P 延误程度与自由时差、总时差之间的关系对项目群误期损害费用的影响。这里对三种情况进行分析:一是合同项目 P 的延误时间小于

等于其自由时差;二是 P 的延误时间为 2 个月,即延误时间等于其自由时差;三是 P 的延误时间为 4 个月,不但大于其自由时差,也大于其总时差。基于 P 不同延误程度的 Y 误期损害费用优化结果对比分析(P 延误时间=0、2、4 个月)见表 7。

表 7 P 不同延误程度的 Y 误期损害费用优化结果对比分析(P 延误时间=0、2、4 个月)

| 序号 | 对比项                             | 项目群误期损害费用优化结果/万元 |
|----|---------------------------------|------------------|
| 1  | P 的延误时间为 0 个月,即延误时间小于等于其自由时差    | 0                |
| 2  | P 的延误时间为 2 个月,即延误时间等于其自由时差      | 401.86           |
| 3  | P 的延误时间为 4 个月,不但大于其自由时差,也大于其总时差 | 827.52           |

注:如果非业主原因导致延误,P 的自由时差为 0 个月,总时差为 2 个月。

由表7可知,当P延误时间为0时,此时延误时间等于其自由时差,项目群误期损害费用为0(因非业主风险责任或风险);当P延误时间为2个月时,此时延误时间大于自由时差,项目群误期损害费用为401.86元;当P延误时间为4个月时,此时延误时间大于自由时差,项目群误期损害费用为827.52万元。经过分析,当P延误时间小于等于其自由时差,项目群误期损害费用最小,而P延误时间大于其总时差,项目群误期损害费用最大。可见,P延误时间与其自由时差、总时差之间的关系是影响项目群误期损害费用的关键。

结果解释:首先,如果P的延误时间小于等于其自由时差,P的延误只会影响其自身,不会影响紧后和后续合同项目的开始时间,也不会影响里程碑和项目群工期,故项目群误期损害赔偿金额很小。其次,如果P延误时间超过其自由时差,那么延误将对其紧后和后续合同项目的最早开始时间产生不利的影响,故项目群误期损害赔偿金额变增大。最后,如果P延误时间超过其总时差,那么延误不但影响其自身的完工时间,而且影响其紧后和后续合同项目的最早开始时间,同时还会影响里程碑和项目群工期,故项目群误期损害费用增幅变大。如果P拥有自由时差,那么随着延误时间的增加,其对应的项目群误期损害费用增幅将快速上升。

### (五) 对策建议

根据上述分析,本文对业主和有关部门提出以下对策建议:

(1)有关部门在编制多主体下各个合同项目的项目群误期损害赔偿和索赔合同条款时,对于不同合同项目要实行不同的项目群误期损害赔偿和索赔管理的规则。

(2)业主应重视合同项目进度的控制工作,把握合同项目给项目群整体所增加费用的非线性关系,以便采取差异化的管控措施。

(3)为从根本上解决项目群误期损害费用非线性优化问题,有关部门需要出台多主体下项目群误期损害费用管理的合同条件,即在FIDIC、建设工程施工合同等示范文本中增加多主体下合同项目延误损害费用管理方面的合同条款。

## 五、结论

为了解决在超大项目中由于某个项目合同项目延误而造成其他合同项目和项目群延误并且索赔计算困难的问题,本研究站在业主角度,在考虑

NCRPE约束的前提下,以降低业主费用为目标,重点分析了项目群误期损害费用非线性优化原理,提出了一种优化模型。本文主要研究结论如下:

(1)线性和非线性两种情况下项目群误期损害费用优化结果呈现出显著的差异性,误期损害费用非线性优化效果要好于线性优化结果。当合同项目P延误4个月时,项目群误期损害费用线性优化结果为1599.28万元,而非线性优化结果为827.52万元,后者比前者降低48.26%。其主要原因是现行规则按照线性关系,即不考虑项目延误概率等因素进行计算,而本模型考虑了P延误发生的时间、NCRPE不均衡程度、P后面的累积合同金额等因素对项目群带来的非线性影响。

(2)在项目群实施前和实施过程中,项目群误期损害费用优化的对象是不同的。由案例可知,实施前NCRPE费用优化的对象是NCRPE费用,即通过NCRPE需求量的均衡优化,削减NCRPE最大需求强度,缩小NCRPE生产规模,从而实现项目群误期损害费用的优化;而实施过程项目群误期损害费用优化的对象则是紧后和后续合同项目承包商的索赔费用和工期压缩费用,即在NCRPE约束和项目群工期固定下,通过合理安排各合同项目的开始时间和完成时间实现降低项目群误期损害费用的目的。

后续可以从3个方面开展进一步研究:一是按照风险分摊原则和奖惩与激励机制,从理论上开展因合同项目随机性给项目群整体带来不利影响的责任承担;二是研究多主体下合同项目延误损害赔偿管理理论和合同条款;三是基于PERT、GERT方法的项目群误期损害费用非线性优化研究。

### 参考文献:

- [1] Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge and the standard for project management[M]. 7th ed. Pennsylvania: Project Management Institute, 2021:9-11.
- [2] Escobar J, Peña W, García-Cáceres R. Robust multiobjective scheme for closed-loop supply chains by considering financial criteria and scenarios [J]. International Journal of Industrial Engineering Computations, 2023, 14(2): 361-380.
- [3] 丰景春,董灵莉. 多资源约束下基于关键链的项目群工期—费用优化[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4): 132-143.
- [4] 国际咨询工程师联合会,中国工程咨询协会. 施工合同条件(1999年第1版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2002:26-27.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家工商行政管理总局. 建设工程施工合同(示范文本)(GF-2017-0201)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017:40-41.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 建设项目工程总承包合同(示范文本)(GF-2020-0216)

- [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 101–103.
- [7] 陶莎, 盛昭瀚, 朱建波. 交互作用不确定下的项目组合选择鲁棒决策[J]. 中国管理科学, 2017, 25(4): 190–196.
- [8] 彭武良, 陈良威, 马雪丽. 分散式项目群调度的双目标优化方法研究[J]. 管理工程学报, 2021, 35(5): 131–140.
- [9] 李明, 徐蓉. 甲供非商品化资源约束下可中断项目群调度模型[J]. 系统管理学报, 2023, 32(3): 499–511.
- [10] 丰景春, 朱晓婧, 李明, 等. 甲供资源约束条件下南水北调工程项目群工期—费用优化模型研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(1): 153–161.
- [11] 丰景春, 赵越, 陈润东, 等. 项目群业主费用最小条件下费用优化[J]. 系统管理学报, 2021, 30(3): 451–460.
- [12] 袁剑波, 毛红日, 戴坤阳. 非线性关系下绿色施工管理多目标权衡研究[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(9): 33–37.
- [13] Wang T, Li L F. Research on engineering project time-cost optimization based on particle swarm optimization[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 55: 1683–1686.
- [14] 陈军. 基于复杂性降解原理的机场重大工程前期项目管理思路探讨[J]. 中国市政工程, 2024(1): 82–85, 156–157.
- [15] 张可, 杨凯逊, 丰景春, 等. 项目群工期非线性奖励模型研究[J]. 管理工程学报, 2020, 34(5): 122–129.
- [16] Kose T, Bakici T, Hazir Ö. Completing projects on time and budget: A study on the analysis of project monitoring practices using real data[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2022, 71: 4051–4062.
- [17] 张俊光, 刘念. 基于工期—成本综合效用最大的关键链项目缓冲确定[J]. 运筹与管理, 2021, 30(10): 87–94.
- [18] 刘尧, 宋元斌, 李云祥. 多排序施工方案的工期优化算法设计[J]. 系统工程, 2019, 37(2): 150–158.
- [19] Feng H, Feng J, Yang Y. Optimization model of schedule-non-commercial resources provided by employers of large project programs[J]. Engineering Management Journal, 2021(10): 1–13.
- [20] 周清琰, 张可, 赵建龙. 基于核心人力资源胜任力差异的水环境综合治理项目群调度优化模型[J]. 水利经济, 2023, 41(3): 97–105, 126.
- [21] 陈俊杰, 同淑荣, 王曜, 等. 人力资源约束下的项目群调度问题建模与求解[J]. 运筹与管理, 2020, 29(3): 107–116.
- [22] 陈俊杰, 同淑荣, 聂亚菲, 等. 研发项目群人力资源调度研究[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(1): 180–185, 211.
- [23] 朱磊, 石慧, 吴谨. 马尔可夫链预测在 IT 项目进度管理中的应用[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2009, 31(4): 625–628.
- [24] 张沙清, 陈新度, 陈庆新, 等. 基于多步 Q 学习的模具制造项目群随机调度算法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1439–1445.

## Two-stage Nonlinear Optimization Model for Program Delay Damage Cost under NCRPE Constraints

XIE Chunyan<sup>1</sup>, FENG Hui<sup>1</sup>, DING Juan<sup>2</sup>, YAN Yaqi<sup>2</sup>

(1. School of Management Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The optimization and management of delay damages in project clusters, particularly under the constraints of Non-contractual Risk Participation Equilibrium (NCRPE), represent a significant concern for project owners. The issue is especially pertinent given the nonlinear relationship that exists between contract project delays and the collective overdue damage costs incurred by multiple stakeholders. Firstly, the study initially delves into the theoretical and practical dimensions of the deficiencies inherent in calculating collective overdue damage costs within multifaceted stakeholder environments. Subsequently, it explores the intricate nonlinear characteristics of these costs under the constraints imposed by NCRPE. An equilibrium optimization model is then developed for the initial phase of NCRPE prior to the implementation of project clusters. A discrete Markov process has been utilized to characterize the states of contract projects within the cluster and compute the nonlinear probabilities associated with collective overdue damage costs. The objective of this study is to minimize costs arising from contractual uncertainties by formulating a sophisticated second-phase nonlinear optimization model that addresses collective overdue damage expenditures throughout the project execution phase. This endeavor will also delineate solution methodologies that are adaptable across diverse scenarios. The research findings indicate that nonlinear optimization yields superior outcomes in comparison to linear methodologies, particularly with regard to the cumulative costs associated with overdue damages. The proposed model effectively mitigates the delay damages incurred by owners due to contractual uncertainties under current regulations. These results provide a foundation for optimizing collective overdue damage expenses within multi-stakeholder contexts and formulating corresponding management guidelines pertaining to such expenses.

**Key words:** project cluster; contract project; non-commercial resources provided by employer; non-linear; multiagent