

工期不确定性下项目群业主费用现值与鲁棒性权衡研究

胡震云, 陈静妍, 肖志鹏

(河海大学商学院, 江苏 南京, 211100)

摘要:在多主体和工期不确定性环境下,业主追求低项目群费用现值和高鲁棒性之间的权衡。本研究首先界定了研究的问题并分析了相关理论;其次基于多主体特点探讨了业主费用现值与鲁棒性之间的复杂关系并构建了项目群鲁棒性模型;再次探讨了如何在不确定环境下提升费用现值稳健性并构建了权衡模型;最后结合案例分析提出了一系列管理启示。研究表明,在工期延长时间相同时,费用现值与鲁棒性值存在权衡关系,超过某一范围后转化为累积关系;在工期延长时间不同时,两者依然存在权衡关系;随着资源占用费比重降低,潜在工期延长费用现值下降。研究成果为业主决策和项目群调整提供了参考,满足了业主不同的决策偏好。

关键词:项目群;工期不确定性;多主体;费用现值;鲁棒性;权衡

中图分类号:F224.33

项目群是大型基础设施建设的典型组织形式,相较于单一项目,其不确定性更强。考虑到项目群具有多个主体、工期长、投资大等特点,为了有效应对项目群工期的不确定性,业主在项目群中需要实现更加灵活的工期、更低费用现值和更高的鲁棒性。按照 FIDIC^[1]、GF-2017-0201、AIA、IEC 等现行合同条款的规定,当发生不确定性时,一方面,项目群中的合同项目的开始时间、完成时间将出现延迟,业主费用现值将随之增加,项目群鲁棒性也将发生变化;另一方面,从时间价值角度分析,业主费用现值随着工期延长而下降,费用现值下降幅度与工期延长幅度密切相关^[2-3],与此同时,随着工期的延长,项目群鲁棒性将随之提高^[4],但是这种提高存在一个上限,即项目群鲁棒性不可能无限提高。为此,针对项目群不确定性幅度,项目群的基准进度计划需要调整,而各调整方案所对应的业主费用现值与鲁棒性之间存在权衡关系^[4-5],即费用现值与鲁棒性不能同时达到最佳。为此,当项目群工期延长时,业主需要根据给定的鲁棒性值标准,在项目群费用现值与鲁棒性之间作出权衡,以寻求符合

鲁棒性值标准的最低费用现值,并据此确定项目群进度计划调整方案。针对项目群多主体的特点,开展多主体下基于工期不确定性的业主费用现值和鲁棒性之间权衡的研究能够为项目群管理提供理论支撑和实践指导。

一、文献综述

工期、费用现值和鲁棒性是项目群管理研究的热点,已引起学界的广泛关注。当项目群工期延长时,如何根据给定的鲁棒性值标准,寻求符合鲁棒性值标准并使费用现值最小化的项目群进度计划方案是当前的研究热点之一。

学界开展了项目工期延长、误期损害赔偿金及其现值方面的研究,但相关研究主要聚焦于单主体环境。Viles 等采用文献分析法总结出 1 057 种导致项目延误的原因,并采用帕累托图方法,确定了导致项目延误的主要原因^[6]。Pehlivan 等应用蒙特卡罗模拟法建立了仿真模型以模拟工期变化对项目成本估算的影响。仿真结果表明,项目延误的影

收稿日期:2024-08-25;修回日期:2024-10-15

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:胡震云,博士,教授,研究方向为管理科学与工程理论与方法。

通信作者:陈静妍,博士研究生,研究方向为项目管理与工程管理。

E-mail: chenjingyan@hhu.edu.cn

引文格式:胡震云,陈静妍,肖志鹏.工期不确定性下项目群业主费用现值与鲁棒性权衡研究[J].南京工程学院学报(社会科学版),2024,24(4):56-67.

响比现有风险因素的影响更大^[7]。Ballesteros 等分析了 101 个项目后发现,当项目接近尾声时,施工活动开始产生延误,项目成本超预算主要发生在该时间段,此外,大多数项目的工期与成本的相关程度在 0.40 至 0.70 之间^[8]。张立辉等从组合效应研究入手,利用 CPM 网络的时差特性,分析了延误工序之间相互影响的原理,并根据组合效应的影响因素确定了组合效应在各延误工序中的分摊比例^[9]。Huynh 等提出了含激励奖金和赔偿金的综合模型,采用 Shapley 值来确定各自的赔偿金和奖励金^[10]。苏志雄等认为当某些工序的工期延长量超过其经典总时差时,总工期并没有被推迟,但是某些工序的工期延长量远小于其经典总时差时,就已经导致网络不可行^[11]。王艳婷等基于里程碑型、时间型、进展型和费用型等不同支付方式,提出了鲁棒性阈值约束下两阶段净现值最大化优化模型^[12]。陈志等研究并构建了项目期望净现值最大的调度模型,并假设项目活动时间为随机变量,设计了动态规划算法,求解出模型的最优决策和目标值^[13]。

单主体下项目鲁棒性研究较为成熟,而多主体下项目群鲁棒性研究尚处起步阶段,两者之间具有一定的相似性。田文迪等用时差作为调度过程解鲁棒性值^[14]。Mahalleh 等用活动总时差作为 RCP-SP 的鲁棒性值^[15]。Ghoddousi 等以时差加权总和作为 RCPSP 的鲁棒性值^[16]。Zheng 等以修正后的时差总和作为 RCPSP 的鲁棒性值^[17]。Daryani 等基于投资组合优先权重,提出了一种新的鲁棒性指数^[18]。胡振涛等将不确定性造成的损失描述为进度偏离成本,通过近似法推导其期望值并以之作为调度计划鲁棒性的衡量指标^[19]。Ansari 分析了多种不确定性下施工进度、质量和鲁棒性之间的相互影响。结果表明,通过实施鲁棒性的项目进度,项目平均延误时间有所减少^[20]。庞南生等寻优得到了对项目调度鲁棒性影响最小的资源分配方案,提高了调度计划的鲁棒性^[21]。陶莎等考虑了项目交互作用不确定及参数不确定性,建立了鲁棒性可调节的项目组合选择鲁棒优化模型^[22]。

学界的研究主要集中在项目群费用—工期优化方面,而鲜有项目群费用现值与鲁棒性之间权衡关系方面的研究。丰景春等以业主支出的净现值最小为目标,对合理工期下的网络进行优化,实现了项目群工期费用的集成优化^[23]。张俊光等提出了基于关键链工期和成本的双目标优化缓冲的确定方法^[24]。潘泽龙等利用线性计划方法,构建了线性工程施工进度计划工期优化模型^[25]。刘尧等提出了基于混合

整数线性规划的工期压缩优化模型,求解结果给出了最优压缩方案^[26]。丰景春等构建了以甲供非商品化资源(Non Commercial Resources Provided by Employers,简称 NCRPE)的风险型费用现值最小为目标的优化模型,并引入了用于计算风险的合成事件技术^[5]。张洁等针对火箭总装过程中物料不齐套及工人调配等突发事件,构建了面向火箭总装过程的工期延误预警模型^[27]。耿瑞等针对多个存在依赖关系的任务,运用网络中的 z 标记探寻各任务之间的时间依赖关系,在保证工期不被延误的前提下,优化了整个项目的费用^[28]。苏志雄等指出搭接网络能够全面地表示工序之间的各种搭接关系,它更贴近实际情况^[29]。丰慧等的研究结果表明,当项目群工期压缩幅度保持在一定范围内时,业主计划费用现值(或收益)与工期之间存在较为复杂的关系,既有可能是累积关系,也有可能是权衡关系^[30]。

综上所述,现有成果为本文开展研究奠定了基础。但现有研究尚存在两方面不足:一是鲜有基于多主体之间关联效应的项目群鲁棒性标准指标方面的研究;二是鲜有考虑 FIDIC、GF-0201-2017、AIA 等现行合同条款对费用现值和鲁棒性的影响方面的研究。针对现有研究的不足,本文结合项目群的特点,界定了研究问题,构建了多主体下的项目群鲁棒性值,并据此构建了基于项目群工期不确定性的业主费用现值和鲁棒性权衡模型用于案例分析。

本文主要的创新点为:(1)提出了多主体下的鲁棒性值,解决了多主体下项目群进度计划稳健性的度量问题;(2)构建了基于项目群工期不确定性的业主费用现值与鲁棒性的权衡模型,揭示了考虑各主体之间相互影响的费用现值与鲁棒性的权衡关系,解决了满足鲁棒性要求的费用现值最小化问题,满足了业主不同的决策偏好。

二、问题界定与理论分析

(一) 研究问题

合理的投资回报率是业主可持续发展的基础,而费用现值是影响投资回报率的关键因素。本文的研究问题为业主如何针对项目群多主体、不确定性更强等特点,当因不确定性而导致项目群工期延长时,在满足预期鲁棒性的前提下,寻求费用现值最小化。具体问题分为以下 3 点:

(1)多主体下的项目群鲁棒性值用什么指标衡量?它与单主体下的项目鲁棒性值有何区别?

(2)当因不确定性导致项目群工期延长时,如

何根据鲁棒性值标准,寻求满足鲁棒性要求的最小费用现值?

(3) 如何确定项目群基准计划的调整方案?

(二) 概念界定

1. 项目群

根据项目群内涵^[31],项目群是指一组相互关联并且加以集中管理的合同项目。根据是否处于合同环境,项目群可以分为两类:合同环境下的项目群和非合同环境下的项目群。本文研究对象是合同环境下的项目群。项目群具有如下特点:

(1) 能实现“1+1>2”的目的。项目群管理注重合同项目之间、合同项目与项目群之间的交互作用,从而实现“1+1>2”的目的,能解决单项目管理理论不能解决的问题。

(2) 具有多个主体。通常情况下,每个合同项目都对应一个主体,除了项目群业主外,项目群还包括其他主体。

(3) 局部利益服务于整体利益。业主更加关注项目群整体利益,而其他主体则更加关注局部利益(自身合同项目的利益),为此,需要通过项目群管理解决局部利益服务于整体利益的问题。

(4) 合同项目之间具有交互作用。合同项目的延误有可能给其他合同项目和项目群工期带来不利的影响,即传递效应。同时,在传递过程中,合同项目延误的不利影响会得到放大。

综上所述,当因不确定性导致项目群工期延长时,业主需要综合考虑上述特点,通过揭示各调整方案的费用现值与鲁棒性之间的权衡关系,寻求最小费用现值和相应的进度计划调整方案。

2. 项目群业主费用现值

项目群业主费用现值是指将业主需要支付的

所有费用折现到第一个时间单位期初的金额。

(1) 业主需要支付的费用。费用包括资源占用量增加的费用(称为资源增加费用)、潜在工期延长和工期压缩费用(潜在增加费用)。

(2) 费用现值的影响因素。影响因素包括项目群工期、资源占用量、自由时差分布均匀程度、资金时间价值(折现率)。

(3) 折现率。项目群通常按月安排控制性进度计划,为此,一般采用月折现率。

3. 项目群鲁棒性

根据鲁棒性内涵,项目群鲁棒性是指当受到不确定性环境因素和不确定性关键参数的扰动时,项目群抵抗消极干扰、保证项目群目标实现的能力^[32]。鲁棒性能够真实反映项目群的抗干扰能力,体现了其面对不确定性的适应能力。

4. 项目群鲁棒性值

项目群鲁棒性值是用于衡量项目群鲁棒性优劣的一个指标,即衡量项目群抗干扰能力的指标。鲁棒性值标准是指项目群的抗干扰能力要满足的最低值。该值越大,项目群抗干扰能力要求越高。

(三) 理论分析

1. 项目群工期不确定性下业主费用现值与鲁棒性之间的关系

项目群主体包括业主和其他多个独立主体且项目群的工期具有更强的不确定性,这些使得项目群工期发生不同程度的延长。当项目群工期发生延长时,项目群基准计划将发生变化而需要调整,此时,需要确定最佳的项目群进度计划调整方案。项目群费用现值和鲁棒性是业主最关注的两个指标,而这两者之间存在某种关系。项目群工期不确定性下业主费用现值与鲁棒性之间的关系如图1所示。

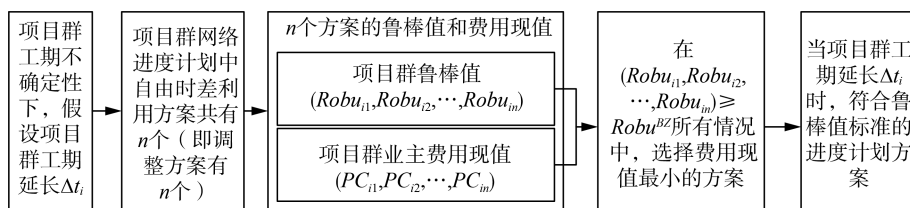


图1 项目群工期不确定性下业主费用现值与鲁棒性之间的关系

根据图1,当项目群工期发生不确定性时,其工期有可能会延长,此时,业主需要调整项目群基准进度计划。

(1) 最佳调整方案的选择。当因不确定性导致项目群工期延长时,有 n 个可供调整的方案。 n 个调整方案均对应各自的业主费用现值和鲁棒性值,即不同调整方案所对应的费用现值和鲁棒性值之

间存在某种关系,此时业主面临如何选择最佳方案的问题。在这种情况下,设定一个鲁棒性值标准($Robu^{BZ}$),在所有可供调整的方案中,鲁棒性值不小于 $Robu^{BZ}$ 的方案均符合要求。此时,业主需要在所有符合鲁棒性值要求的方案中选择费用现值最小的方案,即为最佳调整方案。

(2) 项目群调整进度计划的确定。按照业主费

用现值最小的方案,调整工期延长后的项目群进度计划,将其作为下一阶段项目群的基准进度计划及下一阶段项目群进度控制的依据。

2. 项目群业主费用现值的影响因素

(1)项目群工期。项目群工期与各个合同项目的自由时差直接相关。项目群工期越长,合同项目自由时差越大;反之,项目群工期越短,合同项目自由时差越小。

(2)资源占用量。项目群工期与各合同项目资源之间存在直接关系。项目群工期越长,合同项目自由时差越大,资源占用量越大,资源增加费用越大;反之,项目群工期越短,合同项目自由时差越小,资源占用量越小,资源增加费用越小。可见,资源增加费用与项目群工期成正比。

(3)自由时差分布均匀程度。它与潜在增加费用之间存在直接关系。在工期变化幅度不变的情况下,如果合同项目的自由时差分布越均匀,则潜在增加费用越小;反之,如果各合同项目的自由时差分布越不均匀,那么潜在增加费用越大。可见,潜在增加费用与自由时差分布均匀程度成反比。

(4)资金时间价值。项目群工期越长,资金时间价值越低;反之,项目群工期越短,资金时间价值越高。可见,资金时间价值与项目群工期成反比。

综上所述,在费用现值影响因素中,资源占用量、资金时间价值与项目群工期成反比,部分潜在增加费用与项目群工期成正比,而其他潜在增加费用与自由时差分布均匀程度成反比。由此可见,在多主体下,费用现值与工期存在密切而复杂的关系。

三、模型构建

(一)基本假设与符号说明

1. 模型构建思路

本文根据项目群管理理论及鲁棒理论,在构建多主体下项目群鲁棒性值的基础上,构建了工期延长时费用现值与鲁棒性之间的权衡目标,以鲁棒性值、资源、优先关系为约束条件,构建了不同工期延长时费用现值与鲁棒性值之间的权衡模型。

2. 模型假设

(1)在项目群实施过程中,不考虑合同价格变更和NCRPE总量的变更;(2)不考虑各项目之间的收益交互、资源交互、项目依赖等交互关系;(3)仅考虑不可再生资源对项目组合的资源约束;(4)项目群中合同项目之间的逻辑关系保持不变;(5)资源占用费用、工期变化费用等发生在每个合同项目

的期初;(6)采用一次性支付方式。

(二)多主体下项目群鲁棒性值

1. 多主体下项目群鲁棒性值的构建思路

(1)自由时差分布均衡程度

在多主体下,其他主体均与业主存在合同关系,而这些主体之间不存在合同关系,但是合同项目之间存在逻辑关系。换言之,合同项目不确定性除了会给自己自身造成不利影响外^[27,33],还有可能会对紧后合同项目、后续合同项目、里程碑和项目群工期产生不利的影响,并且这种不确定性给项目群带来的影响具有连锁效应和放大效应。为此,针对多主体的情境,本文参照将活动时差作为鲁棒性值的参考文献^[16,32],提出了项目群鲁棒性值。不确定性可能会对合同项目造成3种不同的影响:一是合同项目延误时间小于等于自由时差;二是合同项目延误时间大于自由时差但小于等于总时差;三是合同项目延误时间大于总时差。

a. 合同项目潜在延误时间小于等于自由时差。合同项目潜在延误只造成其自身的延误,不会影响紧后合同项目和后续合同项目,也不会影响里程碑和项目群工期。在这种情况下,不确定性给项目群造成的损失程度最小。

b. 合同项目潜在延误时间大于自由时差但小于等于总时差。合同项目潜在延误除了造成其自身的延误外,还会影响其紧后合同项目和部分后续合同项目的开始时间,有可能影响里程碑工期,但不会影响项目群工期。在这种情况下,不确定性给项目群造成的损失程度适中。

c. 合同项目潜在延误时间大于总时差。合同项目潜在延误除了造成其自身的延误外,还会影响紧后合同项目和部分后续合同项目的开始时间以及里程碑工期和项目群工期。在这种情况下,不确定性给项目群造成的损失程度最大。

通过上述分析,合同项目自由时差的大小和应用是关键。潜在增加费用现值与项目群工期之间关系密切,在有些情况下,两者同增同降,而在有些情况下,两者之间的关系则不然。此时,如果延长项目群工期且将增加的时间配备给损害度和自由时差乘积最大的合同项目,能够提高项目群鲁棒性,即稳健性。本文在此条件下,研究潜在增加费用现值与工期之间的关系。

(2)合同项目潜在延误损害程度

不同合同项目潜在延误相同的时间给项目群造成的损害程度存在差异。不同的合同项目潜在延误单位时间的损害度是不同的。因此,项目群鲁

棒性除了要考虑潜在延误时间的均衡程度外,还要考虑合同项目延误单位时间给项目群造成的损害。

上述分析表明,如果潜在延误时间集中在个别或少数合同项目,则有可能导致部分合同项目的潜在延误时间大于其自由时差,此时,潜在误期损害赔偿金将有较大幅度的增加。如果潜在延误时间超过合同项目的总时差,合同项目潜在增加费用将有更大幅度的增加,同时,对项目群工期产生不利的影响,从而产生项目群潜在误期损害赔偿金。由此可见,在潜在延误总时间不变的情况下,潜在延误时间在各个合同项目之间分布的均衡程度是降低潜在误期损害赔偿金以及提高项目群稳健性的关键。

2. 多主体下项目群鲁棒性值的构建

针对多主体环境,本文依据项目群鲁棒性值的构建思路,得到鲁棒性值的计算公式:

$$Robu = \text{Max}DE_i \text{ and } \text{Min}PC_i \quad (1)$$

式中, PC_i 为合同项目 i 插入 1 个月自由时差后,项目群工期延长 1 个月增加的费用现值, $i=1,2,\dots,n$; DE_i 为合同项目 i 插入 1 个月自由时差后,项目群工期延长 1 个月对应的延误时间分布均衡系数,计算公式为:

$$DE_i = \frac{w_{DT_i \leq FF_i}}{w_i} \quad (2)$$

式中, $DT_i \leq FF_i$ 为第 i 个合同项目潜在延误时间小于等于其自由时差; $w_{DT_i \leq FF_i}$ 为潜在延误时间小于等于自由时差的合同项目 i 潜在延迟单位时间所造成的成本损失; w_i 为损害度系数,即合同项目 i 潜在延迟单位时间所造成的成本损失,计算公式为:

$$w_i = C_i [(1+r)^{-s_i} - (1+r)^{-(s_i+1)}] \quad (3)$$

式中, C_i 为合同项目 i 的合同金额; s_i 为第 i 个合同项目的开始时间; r 为折现率。

由式(2)可见,如果潜在延误时间分布均衡系数等于 1,表明所有合同项目潜在延误时间均小于等于其自由时差,合同项目潜在延误仅影响其自身完工时间,此时只产生自身潜在误期损害赔偿金,不会对其他合同项目开始时间及项目群工期产生影响。可见,合同项目潜在延误时间分布均衡系数越大,其鲁棒性值越大,表示费用现值最小、项目群进度计划越稳健、抗干扰能力越强。

(三) 项目群工期延长时费用现值—工期之间权衡模型

1. 权衡目标

当项目群工期延长时,业主费用变化体现在 3

个方面:一是合同项目资源费用与项目群工期成正比。这是因为项目群工期 T 与自由时差 FF_i 直接相关,项目群工期较长时,合同项目之间的空余时间会增加,自由时差 FF_i 也更大,资源占用量增多从而使得成本增加,反之,工期较短时则资源费用降低。二是资金时间价值与项目群工期成反比。这因为项目群工期越长,资金时间价值越低;反之,资金时间价值越高。三是业主费用与项目群工期之间关系。部分潜在增加费用与项目群工期成正比,而部分潜在增加费用与自由时差分布均匀程度成反比。

根据上述分析,部分潜在增加费用现值与项目群工期是同增同降的关系,而另外一部分潜在增加费用现值与项目群工期成反比。在满足约束条件的基础上,本文提出了项目群业主费用现值与鲁棒性两者之间的权衡目标:

$$\begin{cases} \text{Min}T = s_{n+1} \\ \text{Min}PC = PC_1 + PC_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, T 为项目群工期; s_{n+1} 为虚拟结束合同项目 $n+1$ 的开始时间; PC_1 为资源增加费用现值; PC_2 为潜在增加费用现值。

$$\begin{cases} \text{Min}PC_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K [c_k(d_i + FF_i) \times r_{ik}] (1+r)^{-s_i} \\ \text{Min}PC_2 = \sum_{i=1}^n [\alpha C_i T_i^c + \beta C_i (s_i^R - s_i^P)] (1+r)^{-s_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中, c_k 为第 k 种资源在单位时间内的单位占用成本; s_i 为第 i 个合同项目的开始时间; d_i 为第 i 个合同项目的持续时间; r_{ik} 为合同项目 i 执行时对第 k 种资源的需求量; FF_i 为合同项目 i 的自由时差, $FF_i = \text{Min}_{j \in \text{Succ}_i} (s_j - d_i) - s_i, i=1,2,\dots,n$; Succ_i 为合同项目 i 的紧后合同项目集合; r 为折现率; α 为合同项目潜在压缩单位时间赔偿费率; C_i 为合同项目 i 的合同金额; T_i^c 为合同项目 i 的压缩工期; β 为合同项目潜在延误单位时间赔偿费率; s_i^R 为合同项目 i 的实际开始时间; s_i^P 为合同项目 i 的计划开始时间。

2. 约束条件

(1) 项目群潜在延误时间分布均衡系数需要大于一个下限值:

$$DE_i = \frac{NUM_{DT_i \leq FF_i}}{NUM_{TOT}} \geq DE_1^{BZ} \quad (8)$$

式中: DE_i 为合同项目潜在延误时间分布均衡系数; $NUM_{DT_i \leq FF_i}$ 为潜在延误时间小于等于自由时差

的合同项目数量; NUM_{TOT} 为合同项目总数量; $DT_i \leq FF_i$ 为第 i 个合同项目潜在延误时间不大于其自由时差; DE_i^{BZ} 为给定的潜在延误时间分布均衡系数下界。

(2) 项目群鲁棒性值需要大于一个下限值:

$$DE_i = \frac{w_{DT_i \leq FF_i}}{w_i} \geq Robu_1^{BZ} \quad (9)$$

式中, w_i 为合同项目 i 的权重; FF_i 为合同项目 i 的自由时差; $Robu_1^{BZ}$ 为给定的鲁棒性值下界。

(3) 第 t 时刻项目群第 k 种资源需求量之和要小于等于最大供应量:

$$\sum_{i \in V^t} r_{ik} \leq R_{ik} \quad (10)$$

式中, V^t 为 t 时刻正在执行的合同项目的集合; r_{ik} 为 t 时刻第 k 种资源的需求量, $k=1, 2, \dots, K$; R_{ik} 为 t 时刻第 k 种资源的最大供应量; i 为第 i 个合同项目, $i=1, 2, \dots, n$ 。

(4) 合同项目 i 的完成时间不得大于紧后或后续合同项目 j 的开始时间:

$$s_i + d_i \leq s_j \quad (11)$$

式中: s_i 为合同项目 i 的开始时间, $i=1, \dots, n$; d_i 为第 i 个合同项目的持续时间; s_j 为合同项目 j 的开始时间, $j \in Succ_i$; $Succ_i$ 为合同项目 i 的紧后合同项目集合。

(5) 合同项目 i 的开始时间 s_i 为非负整数:

$$s_i \in \{0, 1, 2, 3, \dots\} \quad (12)$$

(四) 项目群工期延长时合同项目自由时差分配步骤

当项目群工期延长时, 合同项目自由时差分配步骤如下:

(1) 计算各合同项目单位时间的成本费用与延迟单位时间需要补偿的费用;

(2) 分析开始时间为 0 的合同项目插入 1 个单位时间自由时差后的变动情况;

(3) 按照开始时间为 0 的合同项目插入 1 单位时间自由时差后的变动情况进行分类, 当合同项目 i 插入 1 单位时间自由时差的后续合同项目变动情况, 与合同项目 j 插入 1 单位时间自由时差的后续合同项目变动情况相同 ($i \neq j$), 则合同项目 i 和 j 属于同一类;

(4) 每一类变动情况定义为一种变动路线, 计算每条变动路线受到影响的合同项目, 并按开始时间进行升序排序, 开始时间相同则按序号升序排序, 得到序列 S ;

(5) 对于每条变动路线的合同项目, 按序列 S 进行 1 个单位自由时差的插入并计算项目群费用现值与鲁棒性值, 筛选出费用现值最小与满足鲁棒性值约束的合同项目;

(6) 比较各条变动线路筛选出的合同项目插入 1 单位自由时差后的费用现值, 费用现值最小的自由时差插入方案为最优方案, 得到项目群进度计划 S_1^* ;

(7) 如果要插入 N 个单位时间的自由时差, 以得到新进度计划为基础, 重复 $N-1$ 次步骤(2)~(6)。

四、案例分析

(一) 案例背景

1. 项目群 Z 概况

长江大保护水环境综合项目群 Z 位于 X 市, 包括河道整治、滨岸生境修复和改善、景观提升、调蓄池、小区改造、水生植物、截污管网、生态清淤工程、两河地下污水处理厂、污水处理厂二期、底泥内源治理、水生态修复、河道防洪(1)、河道防洪(2)共 14 个合同项目, 分别用 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L、M、N 表示。项目群 Z 总合同金额为 87 370 万元, 其中 NCRPE 费用为 19 488 万元。在项目群 Z 实施前, 业主采用一次性招标方式确定 14 个承包商(14 个主体)并分别与 14 个承包商签订合同。合理工期下项目群 Z 的双代号网络计划如图 2 所示。

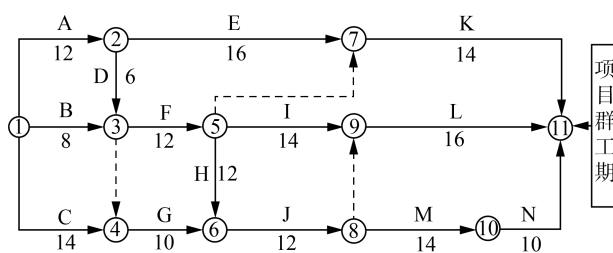


图 2 合理工期下项目群 Z 的双代号网络计划

2. 项目群 Z 信息

(1) 项目群 Z 的基本信息如表 1 所示。

(2) 项目群 Z 中 14 个合同项目之间的逻辑关系如图 2 所示。

(3) 合同项目潜在误期损害单位时间赔偿费率 $\alpha = 2.1\%/月$ 。因非承包商合同责任或风险导致合同项目承包商开工时间延误的, 承包商可以向业主提出索赔。索赔金额常见的计算方法之一是按照索赔费率乘以合同价格计算得到, 即 $2.1\%/月 \times$ 合同金额。

表 1 项目群 Z 的基本信息

序号	合同项目代号	持续时间/月	最早开始时间/月	最迟开始时间/月	最早完成时间/月	最迟完成时间/月	总时差/(自由时差)/月	资源占用费用/(万元·月 ⁻¹)				资源需求量				合同金额/万元	合同项目最短工期/月
								核心人力资源费用	工程设备费用	水泥费用	NCRPE 占用费用	核心人力资源需求量	工程设备需求量	水泥需求量	NCRPE 需求量		
1	A	12	0	0	12	12	0(0)	28	123	102	280	6	5	48	72	7 200	9
2	B	8	0	10	8	18	10(10)	32	102	89	210	8	5	40	64	4 300	6
3	C	14	0	18	14	32	18(4)	14	78	63	189	6	4	98	140	4 200	12
4	D	6	12	12	18	18	0(0)	54	203	129	320	4	3	36	66	9 800	5
5	E	16	12	48	28	64	36(2)	39	183	172	279	10	6	112	144	7 540	13
6	F	12	18	18	30	30	0(0)	78	211	204	268	8	3	60	84	6 900	10
7	G	10	18	32	28	42	14(14)	56	209	188	249	6	2	50	70	12 000	8
8	H	12	30	30	42	42	0(0)	102	202	176	209	4	4	84	108	4 290	10
9	I	14	30	48	44	62	18(10)	98	267	222	310	8	5	98	140	3 950	11
10	J	12	42	42	54	54	0(0)	120	281	278	218	8	6	72	96	3 450	10
11	K	14	30	64	44	78	34(34)	88	204	310	300	12	5	70	98	7 840	12
12	L	16	54	62	70	78	8(8)	48	240	238	350	10	4	128	176	6 750	12
13	M	14	54	54	68	68	0(0)	78	233	220	178	6	3	42	70	4 550	11
14	N	10	68	68	78	78	0(0)	85	229	189	156	8	6	50	60	4 600	8

(4)合同项目潜在工期压缩单位时间赔偿费率 $\beta=2.4\%$ /月。因非承包商合同责任或风险要求合同项目工期压缩的,承包商可以向业主提出工期压缩费用。工期压缩金额一般按照月工期压缩费率乘以合同价格计算得到,即 $2.4\%/月\times$ 合同金额。

(5)月折现率为 0.48%;自由时差时间分布均

衡系数下限值(即鲁棒性值标准 $Robu^{BZ}$)为 6 100(略高于合理工期下的项目群 Z 双代号网络的鲁棒性值)。

(6)合理工期下项目群 Z 的双代号时标网络计划图。经过计算,项目群 Z 工期为 76 个月,关键线路为 $A \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow H \rightarrow J \rightarrow M \rightarrow N$ 。据此绘制的项目群 Z 双代号时标网络图如图 3 所示。

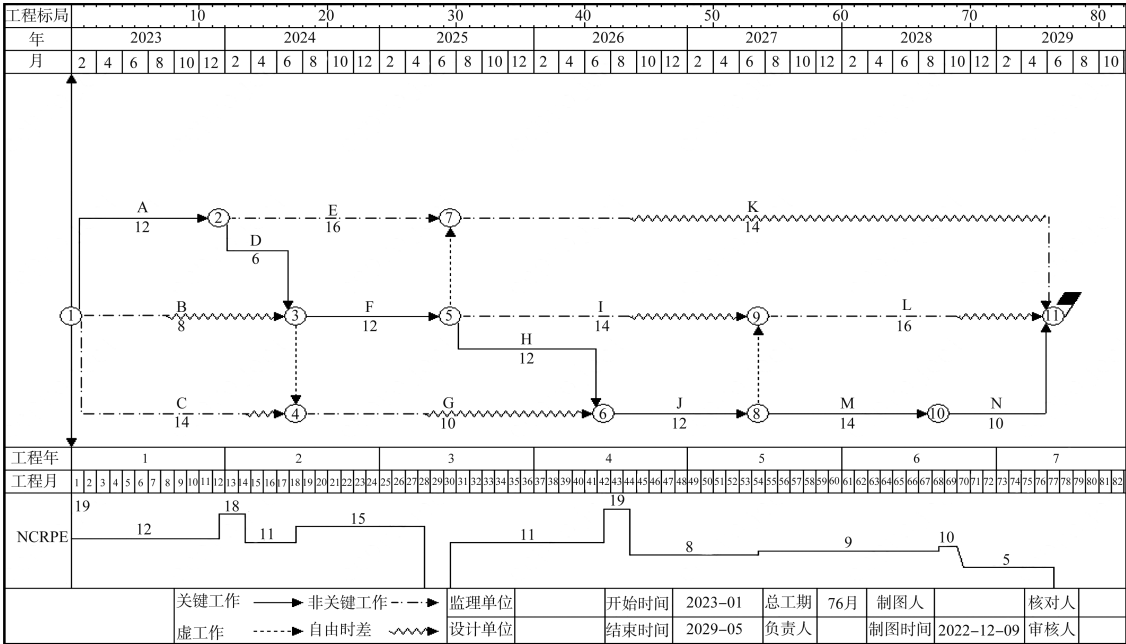


图 3 合理工期下项目群 Z 的双代号时标网络计划

(二) 费用现值结果计算

1. 项目群 Z 权衡目标

根据已确定的合理工期下项目群 Z 的进度计划(如图 2、图 3 所示),本文假设在项目群开工前,

项目群 Z 工期延长 $N(N=1,2,\cdots,20)$ 个月,将 N 个月合理分配到项目群 Z 中相应合同项目的自由时差中,在鲁棒性值的约束下,实现项目群 Z 费用现值最小化的目标。

2. 项目群 Z 工期延长时费用现值与鲁棒性值之间的关系

(1) 项目群 Z 工期延长 1 个月时费用现值与鲁棒性值之间的关系

由于计算工作量和计算篇幅比较大,这里以项目群 Z 工期延长 1 个月为例,计算鲁棒性值约束下,因项目群 Z 工期延长而增加的费用现值。计算顺序为从左向右。计算过程如下:

1) 网络节点 1 有 A、B、C 3 项合同项目,分别对 3 个合同项目各添加 1 个月的自由时差,计算得到因项目群 Z 工期延长而增加的项目群业主费用现值 PC_i 与延误时间分布均衡系数 DE_i : $PC_A = 162\ 394.37$ 万元, $DE_A = 6\ 685.73$ 万元·月; $PC_B = 163\ 072.73$ 万元, $DE_B = 6\ 660.89$ 万元·月; $PC_C = 163\ 224.47$ 万元, $DE_C = 6\ 360.91$ 万元·月。

2) 将 A、B、C 3 个合同项目插入 1 个月自由时差后的变动情况分为 3 类,分别计算 3 条变动路线上各合同项目插入 1 个月自由时差后的项目群业主费用现值 PC_i 与延误时间分布均衡系数 DE_i 。

a. A 路线计算结果。在 A 路线 13 种组合方案中,当 L 插入 1 个月自由时差时,Z 工期延长 1 个月所增加的费用现值 $PC_L = 162\ 357.73$ 万元,延误时间分布均衡系数 $DE_L = 6\ 157.15$ 万元·月,只有该组合方案满足式(1)、式(7)的要求,即鲁棒性值取 13 种情况中延误时间分布均衡系数满足 $Robu^{BZ}$ 且费用现值最小的延误时间分布均衡系数。此时费用现值为 162 357.73 万元,鲁棒性值为 6 181.45 万

元·月。因此,将项目群 Z 工期延长 1 个月插入合同项目 E。

b. B 路线计算结果。在 B 路线 11 种组合方案中,当合同项目 E 插入 1 个月自由时差时,项目群 Z 工期延长 1 个月所增加的费用现值 $PC_E = 162\ 177.28$ 万元,延误时间分布均衡系数 $DE_E = 6\ 181.45$ 万元·月,只有该组合方案满足式(1)、式(7)的要求,即鲁棒性值取 11 种情况中延误时间分布均衡系数满足 $Robu^{BZ}$ 且费用现值最小的延误时间分布均衡系数。此时费用现值为 162 177.28 万元,鲁棒性值为 6 181.45 万元·月。因此,将项目群 Z 工期延长 1 个月插入合同项目 E。

c. C 路线计算结果。在 C 路线 8 种组合方案中,当 K 插入 1 个月自由时差时,项目群 Z 工期延长 1 个月所增加的费用现值 $PC_K = 162\ 357.73$ 万元,延误时间分布均衡系数 $DE_K = 6\ 157.15$ 万元·月;当 L 插入 1 个月自由时差,项目群 Z 工期延长 1 个月而增加的费用现值 $PC_L = 162\ 357.73$ 万元,延误时间分布均衡系数 $DE_L = 6\ 157.15$ 万元·月,只有这两种组合方案满足式(1)、式(7)的要求,即鲁棒性值取 8 种情况中延误时间分布均衡系数满足 $Robu^{BZ}$ 且费用现值最小的延误时间分布均衡系数。此时费用现值为 162 357.73 万元,鲁棒性值为 6 157.15 万元·月。因此,将项目群 Z 工期延长 1 个月插入合同项目 E。

3) 项目群 Z 工期延长 1 个月时费用现值最小选择如表 2 所示。

表 2 费用现值及鲁棒性值(项目群 Z 工期延长 1 个月)

序号	线路	配备自由时差的合同项目	费用现值/万元	鲁棒性值/(万元·月)	鲁棒性值标准/(万元·月)
1	A 线路	E 插入 1 个月自由时差	162 357.73	6 181.45	6 100
2	B 线路	K、L、N 分别插入 1 个月自由时差	162 357.73	6 157.15	6 100
3	C 线路	K、L、N 插入 1 个月自由时差	162 357.73	6 157.15	6 100

通过比较三条路线上各自费用现值的最小值,A 线路上的合同项目 E 插入 1 个月自由时差时,其费用现值在三条线路中最小(162 357.73 万元)。

4) 项目群 Z 工期延长 1 个月时新的进度计划。当项目群 Z 工期延长 1 个月时,将 1 月配备到 A 线路上合同项目 E,就形成了新的项目群 Z 的进度计划 S_1^* 。

(2) 项目群 Z 工期延长 2、3、…、20 个月时费用现值与鲁棒性值之间的关系

当项目群 Z 工期延长 2、3、…、20 个月时,按

照上述算法,可以分别得到满足鲁棒性值约束的费用现值最小及其所对应的自由时差配备方案并形成相应的项目群 Z 进度计划 S_1^* 、 S_2^* 、 S_3^* 、 S_4^* 、 S_5^* 、 S_6^* 、 S_7^* 、 S_8^* 、 S_9^* 、 S_{10}^* 、 S_{11}^* 、 S_{12}^* 、 S_{13}^* 、 S_{14}^* 、 S_{15}^* 、 S_{16}^* 、 S_{17}^* 、 S_{18}^* 、 S_{19}^* 、 S_{20}^* ,如表 3 所示。

3. 项目群 Z 工期延长 1~20 个月时费用现值与鲁棒性值之间的关系

当项目群 Z 延长 1~20 个月时,业主费用现值与鲁棒性值之间的关系如表 3 所示。

表 3 项目群 Z 工期延长 1~20 个月时业主费用现值与鲁棒性值之间的关系

项目群 Z 延长 时间/月	项目群 Z 费用现值			鲁棒性值			项目群 Z 进度 计划
	项目群 Z 工期不同 延长费用现值/万元	费用现值 增加基比/%	费用现值 增加环比/%	鲁棒性值/ (万元·月)	鲁棒性值增加 基比/%	鲁棒性值增加 环比/%	
0	160 424.18	—	—	6 091.25	—	—	S ₀ [*]
1	162 177.28	1.092 778	1.092 790	6 181.45	1.480 813	1.480 813	S ₁ [*]
2	163 930.03	2.185 350	1.080 762	6 271.44	2.958 178	1.455 807	S ₂ [*]
3	165 682.42	3.277 698	1.068 987	6 361.20	4.431 767	1.431 250	S ₃ [*]
4	167 434.47	4.369 833	1.057 475	6 450.76	5.902 073	1.407 910	S ₄ [*]
5	169 186.17	5.461 751	1.046 200	6 540.10	7.368 767	1.384 953	S ₅ [*]
6	170 937.54	6.553 463	1.035 173	6 629.23	8.832 013	1.362 823	S ₆ [*]
7	172 688.57	7.644 963	1.024 368	6 718.14	10.291 65	1.341 181	S ₇ [*]
8	174 439.26	8.736 251	1.013 785	6 806.85	11.748	1.320 455	S ₈ [*]
9	176 189.63	9.827 339	1.003 427	6 895.35	13.200 9	1.300 161	S ₉ [*]
10	177 939.67	10.918 22	0.993 271	6 983.65	14.650 52	1.280 573	S ₁₀ [*]
11	179 689.39	12.008 91	0.983 322	7 071.74	16.096 7	1.261 375	S ₁₁ [*]
12	181 438.79	13.099 39	0.973 569	7 159.62	17.539 42	1.242 693	S ₁₂ [*]
13	183 187.87	14.189 67	0.964 006	7 247.30	18.978 86	1.224 646	S ₁₃ [*]
14	184 936.64	15.279 76	0.954 632	7 334.78	20.415 02	1.207 070	S ₁₄ [*]
15	186 685.10	16.369 66	0.945 437	7 422.07	21.848 06	1.190 083	S ₁₅ [*]
16	188 433.25	17.459 37	0.936 416	7 509.15	23.277 65	1.173 258	S ₁₆ [*]
17	190 181.10	18.548 88	0.927 570	7 596.03	24.703 96	1.156 988	S ₁₇ [*]
18	191 928.65	19.638 22	0.918 887	7 682.72	26.127 15	1.141 254	S ₁₈ [*]
19	193 675.90	20.727 36	0.910 364	7 769.22	27.547 22	1.125 903	S ₁₉ [*]
20	195 422.85	21.816 32	0.901 997	7 855.52	28.964 01	1.110 794	S ₂₀ [*]

(三) 结果分析

1. 项目群 Z 工期延长不同时间时业主费用现值变化分析

当项目群 Z 工期延长 1~20 个月时,项目群 Z 业主费用现值变化如图 4 所示。

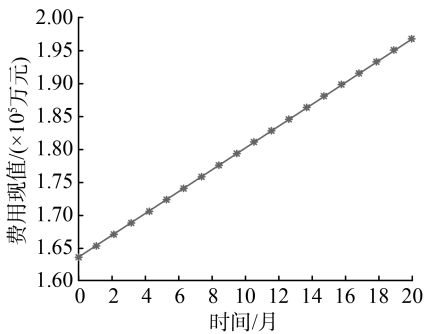


图 4 项目群 Z 工期延长不同时间时业主费用现值变化

由图 4 可见,随着项目群 Z 工期的延长,业主费用现值呈现出增长趋势。当项目群 Z 工期延长 20 个月时,业主费用现值相对于基准进度计划增加了 34 998.67 万元,增长 21.82%。

2. 项目群 Z 工期延长不同时间时鲁棒性值变化分析

当项目群 Z 工期延长 1~20 个月时,项目群 Z

鲁棒性值变化如图 5 所示。

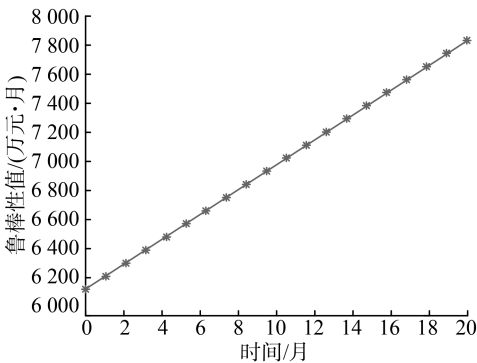


图 5 项目群 Z 工期延长不同时间时鲁棒性值变化

由图 5 可见,随着项目群 Z 工期的延长,鲁棒性值也呈现出增长趋势。当项目群 Z 工期延长 20 个月时,鲁棒性值相对于项目群基准计划增加了 1 764.27 万元·月,增长 28.96%。

3. 项目群 Z 工期延长 1 个月时费用现值与鲁棒性值标准之间关系

限于篇幅,本文只列出项目群 Z 工期延长 1 个月时,费用现值与鲁棒性值标准之间的关系如表 4 所示。项目群 Z 工期延长 2~20 个月时,费用现值与鲁棒性值标准之间关系的数据如有需要,可联系作者获取。

表 4 项目群 Z 工期延长 1 个月时费用现值与鲁棒性值标准之间关系

序号	鲁棒性值标准/(万元·月)	费用现值/万元	鲁棒性值/(万元·月)	调整方案(自由时差配备对象)
1	6 100	162 177.28	6 157.15	合同项目 E 增加 1 个月自由时差
2	6 200	162 538.22	6 392.47	合同项目 F 增加 1 个月自由时差
3	6 300	162 538.22	6 392.47	合同项目 F 增加 1 个月自由时差
4	6 400	162 394.37	6 685.73	合同项目 A 增加 1 个月自由时差
5	6 500	162 394.37	6 685.73	合同项目 A 增加 1 个月自由时差
6	6 600	162 394.37	6 685.73	合同项目 A 增加 1 个月自由时差
7	6 700 及以上	—	—	—

当项目群 Z 工期延长 1 个月时,费用现值与鲁棒性值标准之间关系变化如图 6 所示。

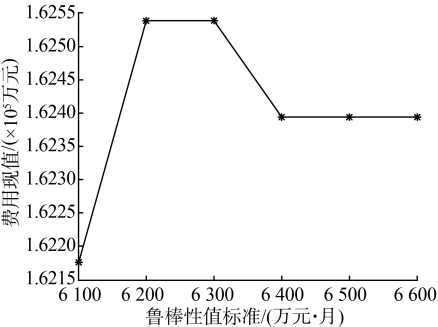


图 6 项目群 Z 工期延长 1 个月时费用现值与鲁棒性值标准之间的关系

由图 6 可见,当 Z 工期延长 1 个月时,随着鲁棒性值标准的提升,费用现值呈现出增加的趋势,项目群 Z 的调整方案也随之变化。同时,由表 5 可见,当鲁棒性值标准大于 6 685.73 万元·月时,项目群的稳健性具有一个上限,不可能无限地提升。

4. 项目群 Z 工期不同延长时间时费用现值与鲁棒性值之间关系分析

当项目群 Z 工期发生不同延长时间时,费用现值与鲁棒性值之间关系如图 7 所示。

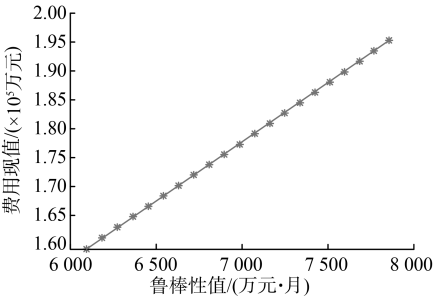


图 7 当项目群 Z 工期发生不同延长时间时费用现值与鲁棒性值之间的关系

表 4 中项目群 Z 工期延长 0~20 个月与图 7 中从左至右的第 1~21 个点相对应。随着项目群 Z 工期延长,费用现值与鲁棒性值均呈现出增长趋势,其中鲁棒性值增长速度要高于费用现值增长速度,

即鲁棒性改进的速度要高于费用现值增长的速度。当项目群 Z 延长 20 个月时,鲁棒性值增长 28.96%,而费用现值则增长 21.82%,后则低于前者。同时,随着鲁棒性值的提高,费用现值呈现出波浪式变化。

(四) 求解方法

项目群属于控制性进度计划,通常以月为单位。项目群工期延误时间比较有限时,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时,也可以采用遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等方法通过迭代寻找最优解。

五、管理启示

(1) 业主通过权衡现值与鲁棒性值之间的关系,实现决策偏好。一是在项目群工期延长时间相同的情况下,业主根据自身的决策偏好,确定鲁棒性值标准;二是在项目群工期延长时间不同的情况下,业主根据工期延长时间、费用现值、鲁棒性值三者之间的关系,实现决策偏好。在可接受的工期延长时间范围内,业主根据鲁棒性值标准,确定费用现值最小的调整方案;在可接受的费用现值范围内,业主根据鲁棒性值标准,确定项目群工期延长时间最短的调整方案。

(2) 业主要严格控制合同项目(主体)之间的关联效应。研究表明,随着项目群工期延长幅度的增加,费用现值呈现出快速增长的趋势,即项目群工期延长幅度与合同项目之间的关联效应成正比,工期延长幅度越大,费用现值增值幅度越大。这表明,相对于单主体环境下,多主体环境下费用现值受不确定性的影响程度具有放大效应。为此,业主要更加严格地控制多主体下项目群工期。

(3) 业主要根据权衡结果,编制项目群调整进

度计划。当项目群工期延长时,业主根据决策偏好、费用现值与鲁棒性值之间的权衡关系,确定项目群调整方案。在项目群基准进度计划的基础上,业主要编制项目群调整进度计划,以此作为下一阶段项目群进度控制的依据。

六、结论

(1)当项目群进度计划鲁棒性值标准确定在一定范围内,费用现值与鲁棒性之间存在权衡关系,一旦鲁棒性值标准超过上述范围,费用现值与鲁棒性之间没有关系。因此,明确每一种工期延误时间所对应的费用现值与鲁棒性之间权衡关系的鲁棒性值标准范围很有必要。

(2)项目群进度计划稳健性具有一个上限。当因不确定性导致工期延长同一个时间时,项目群进度计划稳健性具有一个上限,换言之,项目群进度计划的稳健性不可能无限地提升。因此,鲁棒性值标准的取值具有一个上限。正如案例研究结果显示,当项目群 Z 工期延长 1 个月时,鲁棒性值标准分别取 6 400、6 500、6 600 万元·月,项目群 Z 进度计划实际鲁棒性值均为 6 685.73 万元·月,这意味着鲁棒标准定得再高,项目群 Z 进度计划的稳健性也不可能再得到提升。

(3)随着项目群工期延长时间的增加,费用现值与鲁棒性值呈现出正相关关系。项目群工期延长时间越多,项目群进度计划稳健性越好,但是费用现值呈现出快速增长趋势。与项目群基准计划相比,工期延长 1 个月时,费用现值增长幅度为 1.09%,而工期延长 20 个月时,费用现值增长幅度为 21.82%,后者是前者的 19.29 倍。与项目群基准计划相比,工期延长 1 个月时,鲁棒性值增长幅度为 1.48%,而工期延长 20 个月时,费用现值增长幅度为 28.96%,后者是前者的 19.56 倍。这说明费用现值与鲁棒性之间存在权衡关系,即不可能同时达到最佳,同时也说明工期延长时间越多,费用现值增长幅度越大,意味着各主体之间关联效应越大。

(4)随着资源占用费的下降,自由时差应更多地配置在项目群网络后半部分,这样潜在延误增加费用会随之下降,合同项目(主体)之间的关联效应也将随之削弱。换言之,随着项目群工期的延长,费用现值增速呈现出下降趋势。

本研究在算法设计上有待进一步拓展,加强折现率敏感性等分析能够增强结论的普适性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宁敏静,郑小强,余晓钟,等. 随机活动工期下考虑缓冲成本及效用的融资费用最小化项目调度优化研究[J]. 运筹与管理,2023,32(5):29-35.
- [3] 刘万琳,张静文,刘婉君. 带有资源柔性约束的 max-NPV 分布式多项目调度问题[J]. 运筹与管理,2021,30(8):37-43.
- [4] 张立辉,郭欣雨,邹鑫,等. 考虑工作连续性的重复性项目鲁棒调度优化[J]. 科技管理研究,2023(14):218-225.
- [5] 丰景春,刘琴,陈润东,等. 基于合成事件技术的项目群甲供非商品化资源的配置优化[J]. 系统管理学报,2023,32(1):53-63.
- [6] Viles E, Rudeli N C, Santilli A. Causes of delay in construction projects: A quantitative analysis[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2020, 27(4):917-935.
- [7] Pehlivan S, Öztelmir A E. Integrated risk of progress-based costs and schedule delays in construction projects[J]. Engineering Management Journal, 2018, 30(2):108-116.
- [8] Ballesteros-Perez P, Sanz-Abianedo E, Soetanto R, et al. Duration and cost variability of construction activities: An empirical study[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, 146(1):04019093.
- [9] 张立辉,柴剑雪,乞建勋,等. 一种基于时差的工期索赔分析方法[J]. 中国管理科学,2020,28(4):174-185.
- [10] Huynh H T, Lucko G, Eid M S. Game theory approach for concurrent delay analysis[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2023, 149(3):04023002.
- [11] 苏志雄,乞建勋,张立辉. 广义优先关系下隐性时间、隐性时差和伪时差[J]. 管理科学学报,2015,18(12):68-78.
- [12] 王艳婷,郑维博,马志强,等. 不同业主支付方式下基于鲁棒性阈值的净现值最大化项目调度优化[J/OL]. 中国管理科学(2022-09-22)[2024-02-17]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0306>.
- [13] 陈志,白思俊,郭云涛. 随机活动工期下求解资源约束项目最大期望净现值的动态调度算法[J]. 运筹与管理,2022,31(6):17-24.
- [14] 田文迪,胡慕海,崔南方. 不确定性环境下鲁棒性项目调度研究综述[J]. 系统工程学报,2014,29(1):135-144.
- [15] Mahallen M K K, Ashjari B, Yousefi F, et al. A robust solution to resource-constraint project scheduling problem[J]. International Journal of Fuzzy Logic & Intelligent Systems, 2017, 17(3):221-227.
- [16] Ghoddousi P, Ansari R, Makui A. An improved robust buffer allocation method for the project scheduling problem[J]. Engineering Optimization, 2016, 49(4):718-731.
- [17] Zheng W, He Y. Resource constrained project scheduling optimization with robust objective under stochastic duration of activities[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2016: Theory and Application of Industrial Engineering. Atlantis Press, 2017:239-243.
- [18] Daryani A M, Omran M M, Makui A. A novel heuristic, based

- on a new robustness concept, for multi-objective project portfolio optimization [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020 (139): 106187.
- [19] 胡振涛,崔南方,冷凯君,等. 项目调度计划的鲁棒性评价指标构建与应用[J]. *系统工程理论与实践*,2024,44(5):1669-1679.
- [20] Ansari R. Dynamic optimization for analyzing effects of multiple resource failures on project schedule robustness[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*,2021, 25(5): 1515-1532.
- [21] 庞南生,叶博童. 项目鲁棒调度的资源分配启发式算法研究[J]. *运筹与管理*,2021,30(8):21-27.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 潘泽龙,周国华,黄超然. 基于 IGSA 的线性工程施工进度计划优化模型研究[J/OL]. *中国管理科学*(2023-06-08)[2024-02-17]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.1627>.
- [26] 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.
- [27] 张洁,赵新明,张朋,等. 面向火箭总装过程的工期延误预警方法[J]. *上海交通大学学报*,2020,54(3):322-330.
- [28] 耿瑞,朱建军,王嵩华,等. 基于 z 标记的灰色 GERT 多任务项目费用优化研究[J]. *中国管理科学*,2017,25(4):133-142.
- [29] 苏志雄,乞建勋,阚芝南,等. 搭接网络的新表示方法与奇异现象研究[J]. *系统工程理论与实践*,2015,35(1):130-141.
- [30] 丰慧,张焱,张辰颖,等. 多主体下具有多个禁止时间窗口的项目群业主计划费用现值优化模型——以新沂河整治项目群为例[J]. *科技管理研究*,2023(19):205-220.
- [31] Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge[M]. Philadelphia: Project Management Institute,2021.
- [32] 李雪,何正文,王能民. 不确定环境下基于时间、费用及鲁棒性权衡的多目标项目调度优化[J]. *运筹与管理*,2019,28(1):6-16.
- [33] 迟国梁. 关于新时代流域水环境治理技术体系的思考[J]. *水资源保护*,2022,38(1):182-189.

An Investigation into the Trade-off Between the Present Value of Program Employer Costs and Robustness in Project Portfolio Under Uncertainty of Construction Period

HU Zhenyun, CHEN Jingyan, XIAO Zhipeng
(Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In an environment characterized by multiple agents and uncertainty in project duration, stakeholders endeavor to strike a delicate balance between minimizing the present value of collective project expenditures and maximizing overall resilience. This study initially defines the research problem and analyzes relevant theories. Subsequently, it delves into the intricate interplay between the present value of the owner's costs and robustness, drawing upon multi-agent characteristics, ultimately constructing a sophisticated model for project group robustness. Furthermore, this study explores methods to enhance the stability of cost present value under uncertain conditions and develops a trade-off model. Finally, through case analysis, a series of management insights are articulated. The findings suggest that a trade-off relationship exists between the present value of costs and robustness when the duration extension remains constant. Beyond a certain threshold, this relationship evolves into an accumulative one. Even when varying durations are taken into account, a trade-off persists between these two factors. As the proportion of resource occupancy costs diminishes, any potential increase in duration results in a decline in cost present value. The research findings offer profound insights that significantly enhance the decision-making processes of owners and facilitate strategic adjustments to their project portfolios, thereby accommodating the varied preferences inherent in their decision-making styles.

Key words: project cluster; duration uncertainty; multiagent; present value of employers' cost; robustness; trade-off