

# 控制与决策

Control and Decision

## 项目调度与物料订购集成优化研究综述

胡雪君, 王建江, 崔南方, 赖慧玲

引用本文:

胡雪君, 王建江, 崔南方, 赖慧玲. 项目调度与物料订购集成优化研究综述[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2189–2200.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0774>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于动态资源权重的多技能项目调度启发式算法

Dynamic resource priority-based heuristics for multi-skill resource constrained project scheduling problem

*控制与决策*. 2021, 36(10): 2553–2561 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0070>

#### 基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题

An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem

*控制与决策*. 2021, 36(3): 669–676 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0906>

#### 面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度

Distributed multi-project resource scheduling oriented to manufacturing of building materials equipment group

*控制与决策*. 2021, 36(9): 2133–2142 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1802>

#### 区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

*控制与决策*. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

#### 可持续逆向物流网络设计研究进展及趋势

Progress and prospects of sustainable reverse logistics network design

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2561–2577 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1175>

# 项目调度与物料订购集成优化研究综述

胡雪君<sup>1</sup>, 王建江<sup>2†</sup>, 崔南方<sup>3</sup>, 赖慧玲<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 工商管理学院, 长沙 410082; 2. 国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073; 3. 华中科技大学 管理学院, 武汉 430074)

**摘要:** 在项目管理实践中, 活动安排与物料供应相互影响、相互制约, 需要对这两个决策事项进行协同管理和规划. 项目调度与物料订购集成优化问题 (project scheduling and material ordering problem, PSMOP) 研究的是如何合理制定项目调度和物料采购协同计划, 以实现项目总成本最低、净现值最大、总工期最短等目标. PSMOP 因其重要的理论价值和应用前景, 近年来受到学术界和产业界的广泛关注. 鉴于此, 对国内外项目调度与物料订购集成优化的相关研究成果进行系统性总结与梳理: 首先, 介绍 PSMOP 问题及其常见的目标函数; 其次, 针对确定和不确定环境, 分别总结了考虑不同特征的集成优化问题研究进展; 然后, 归纳了 PSMOP 常用求解算法及其在实践领域的应用情况; 最后, 指出未来进一步的研究方向.

**关键词:** 项目调度; 物料订购; 集成优化; 数学模型; 算法; 综述

中图分类号: F224

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0774

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 胡雪君, 王建江, 崔南方, 等. 项目调度与物料订购集成优化研究综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2189-2200.

## Integrated project scheduling and material ordering: A literature review

HU Xue-jun<sup>1</sup>, WANG Jian-jiang<sup>2†</sup>, CUI Nan-fang<sup>3</sup>, LAI Hui-ling<sup>1</sup>

(1. Business School, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In project management practice, activity arrangement and material supply interact and restrict each other, and simultaneous planning of these two decision items is of critical importance. The project scheduling and material ordering problem (PSMOP) aims at generating a coordinated project schedule and material procurement plan with the objectives of total cost minimization, net present value maximization, project duration minimization, etc. Due to the theoretical values and the application prospects, the PSMOP has received extensive attention from both academic and industrial fields in recent years. Therefore, a literature review of the research on the integrated project scheduling and material ordering problem is proposed. Firstly, the common objective functions of the PSMOP are introduced. Secondly, the research progress of the integrated optimization problem under both certain and uncertain environments is reviewed according to different problem characteristics. Thirdly, the algorithms for solving the PSMOP together with its application in the practical area are summarized. Finally, some future research directions are presented.

**Keywords:** project scheduling; material ordering; integrated optimization; mathematical models; algorithms; literature review

## 0 引言

全球经济活动中有 30% 是采用项目形式执行, 涉及年产值约 27 万亿美元<sup>[1]</sup>. 在项目管理过程中不可避免地会涉及到资源的使用, 项目资源通常可分为两类: 1) 可更新资源, 如劳动力、设备等; 2) 不可更

新资源, 如物料、资金等. 传统的网络计划技术如关键路径法 (critical path method, CPM) 和计划评审技术 (program evaluation and review method, PERT), 在早期项目管理实践中得到了成功应用, 但是, 其没有考虑现实中广泛存在的资源约束. 随着研究工作的进一

收稿日期: 2021-05-03; 录用日期: 2021-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72071075, 71701067, 71971094, 71801218); 湖南省自然科学基金项目 (2019JJ50039, 2020JJ4672).

责任编辑: 樊治平.

†通讯作者. E-mail: jianjiangwang@nudt.edu.cn.

步发展,资源受限项目调度问题(resource-constrained project scheduling problem, RCPSP)成为项目管理研究的核心内容之一. RCPSP致力于在满足项目活动的工序约束、资源(主要指可更新资源)供给量限制的前提下,确定每个活动的开始时间,以实现工期最短、成本最低、资源利用率最大等目标<sup>[2]</sup>.

进入21世纪以来,现代项目的高复杂性和高质量标准对物料资源供应提出了较高的要求. 据统计,在工程项目中,与物料相关的成本通常占工程总成本的50%~60%,物料供应管理对项目进度的影响高达80%<sup>[3]</sup>. 因此,在项目管理实践中不仅需要对各项目活动进行调度安排,同时需要对物料采购进行决策优化,以实现资源优化配置并达到系统最优目标<sup>[4]</sup>.

当项目管理涉及到物料订购问题(material ordering problem, MOP)时,传统的管理方法通常是采取“两阶段”的处理决策,即:首先在假定物料供应充足的情况下制定项目调度计划;然后基于已有的项目调度计划生成物料需求计划(material requirement planning, MRP). 这种相对独立的决策方式忽略了项

目进度与物料供应之间的相互影响及制约<sup>[5]</sup>. 一方面,物料需求源于项目调度计划,合理的调度计划有利于物料生产和供应计划的制定,例如,对不同活动所需同种物料进行合并订购可以减少订货次数,降低订货成本;另一方面,物料的采购与供应又对进度计划及其执行产生影响,如果物料提早到货,则会产生额外的库存成本和现场拥堵,影响工程现场施工;如果物料延迟到货,则会导致缺货成本,造成项目活动不能按计划开工,最终导致工期延误. 例如,在港珠澳大桥的“人工岛”标段建设过程中,工程施工需要使用砂、石和预制四脚空心方块3种主要材料,它们由3个不同的供应商用运输船从陆地运送到海上的人工岛堆放;这3种材料需要同时配合使用,而岛上空间十分有限,材料多运或少运、早运或晚运都会影响施工进度和成本,必须根据施工计划准时供应. 由此可见,协调项目调度计划和物料供应决策对项目的成功运作至关重要,集成物料订货的项目调度问题值得深入研究<sup>[6]</sup>. 图1给出了项目调度与物料供应协同网络的概念结构.

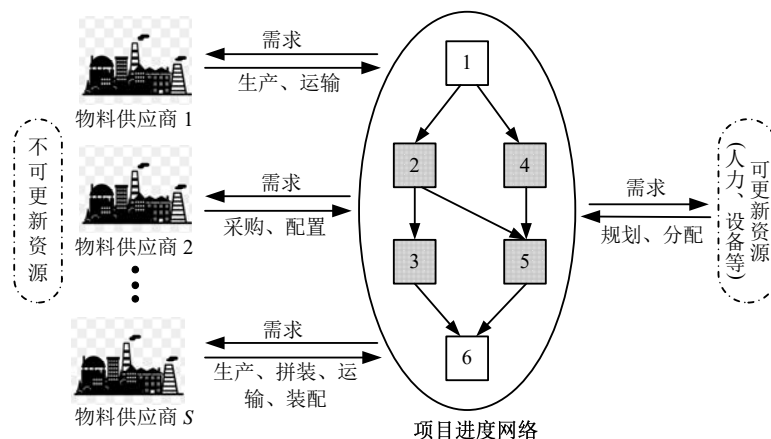


图1 项目调度与物料供应协同网络

Aquilano等<sup>[7]</sup>最早系统地研究项目调度与物料订购集成优化问题(project scheduling and material ordering problem, PSMOP),他们提出了一种综合关键路径法和物料需求计划的混合模型,为PSMOP研究奠定了基础. 此后,PSMOP成为一个迅速发展的新领域,诸多学者就此问题开展了研究,在模型构建与求解、问题拓展与应用方面涌现出大量的研究成果<sup>[8-11]</sup>. 因此,有必要对已有成果进行归纳总结,进一步把握该领域的发展脉络并为后续研究工作提供指导. 本文基于国内外主流学术期刊上发表的研究文献,首先阐述PSMOP问题及其常见目标函数;然后梳理了确定和不确定环境下PSMOP问题的研究进展,归纳了PSMOP常用求解方法;最后,总结了PSMOP

在实践中的应用情况,并指出了项目调度与物料订购集成优化问题未来的研究方向和趋势.

## 1 PSMOP问题描述及研究分类

### 1.1 问题描述

项目调度与物料订购集成优化问题旨在满足活动优先关系和物料需求的前提下,确定每个活动的开始时间、每种物料的订购时间和订购数量等,以实现项目总成本最低、净现值最大、总工期最短等目标. 基本的PSMOP可以描述如下.

1) 项目网络. 一个项目由有向无环图 $G = (N, A)$ 表示. 其中: $N = \{0, 1, \dots, n\}$ 为项目活动节点集合, $A$ 代表活动之间的工序优先关系集合. 当活动

$(i, j) \in A$ 时,表示活动*i*是活动*j*的紧前活动,每个活动只有当其紧前活动全部完成且资源需求均满足的情况下才可以开始.活动1和活动*n*为虚拟活动,分别代表项目的开始和结束,不消耗任何时间和资源.

2) 时间参数.每个非虚拟活动*i*的计划工期记为*d<sub>i</sub>*,活动*i*的开始时间记为*s<sub>i</sub>*.假设每个活动一旦开始便会一直执行到结束(即活动执行不中断,non-preemption),则活动*i*的完成时间等于*s<sub>i</sub>* + *d<sub>i</sub>* ( $\forall i \in N$ ).定义*T*为项目完工时间的上界,项目周期内每个时间段记为*t* = 1, 2, ..., *T*.

3) 资源参数.集合*K*表示整个项目所需的可更新资源类别集合,*k*表示其中的第*k*种资源,  $1 \leq k \leq |K|$ ;活动*i*对资源*k*的单位时间资源需求量记为*r<sub>ik</sub>*,资源*k*在每个时间单位的总供应量记为*R<sub>k</sub>*.集合*M*表示项目所需的物料类别集合,*m*表示其中的第*m*种物料,  $1 \leq m \leq |M|$ ;活动*i*对物料*m*的需求量记为*u<sub>im</sub>*; *T<sub>m</sub>*表示物料*m*的订购提前期.

4) 成本参数. PSMOP问题中涉及到多种项目成本,主要包括库存成本、订货成本、物料成本、可更新资源的使用成本、项目管理费用等.研究中一般假设订货成本只与订货次数有关,而与单次的订货数量无关.项目管理费用主要由现场管理服务费用、安保费用、厂房使用费用组成,为间接成本<sup>[12]</sup>;项目管理费用贯穿于整个项目执行过程中,因此,一般假设项目管理费用与项目工期线性相关<sup>[13]</sup>.

5) 在现实不确定环境下,上述的某个或某些参数可能是不确定的随机变量,例如活动*i*的实际工期(表示为 $\tilde{d}_i$ )、物料订购的提前期(表示为 $\tilde{T}_m$ )等.

PSMOP问题的决策变量一般定义如下:

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & \text{如果活动}i\text{在}t\text{时刻开始;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$y_{im} = \begin{cases} 1, & \text{如果在}t\text{时刻订购物料}m; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

*Q<sub>mt</sub>*: 物料*m*在*t*时刻的订购数量.

求解PSMOP问题即实现对活动开始时间、物料订购时间和订购数量的决策.

### 1.2 目标函数

一般而言,PSMOP的目标函数可以分为3类:效益最大化(PSMOP with maximal benefits, PSMOP-B)、时间最小化(PSMOP with minimal time, PSMOP-T)和鲁棒性最大化(PSMOP with maximal robustness, PSMOP-R).

#### 1.2.1 效益最大化(PSMOP-B)

效益最大化目标进一步归结为两方面:经济效益和社会效益.经济效益主要由项目总成本或净现值衡量,社会效益主要由环境影响衡量.因此,若要追求总效益最大化,则需达到总成本最小化、净现值最大化或者环境影响最小化.表1给出了PSMOP-B所对应的典型目标函数.

表1 PSMOP-B的典型目标函数

优化目标	目标函数	公式序号	主要文献
总成本最小	$\min \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{m=1}^M f_t(m) + \sum_{k=1}^K g_t(k) \right]$	(1)	[5,14-24]
净现值最大	$\max \sum_{i=1}^n \sum_{t=e_i}^{l_i} [f_i(x_{it})g_i(x_{it})](P/F, r\%, t)$	(2)	[25-28]
环境影响最小	$\min \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M EF_{mt}$	(3)	[29-30]

总成本最小化的目标函数见式(1).其中:*f<sub>t</sub>(m)*表示物料*m*在时段*t*产生的成本,主要包括总订货成本(total ordering cost, TOC)和总库存成本(total inventory cost, TIC)等.具体地, *OC<sub>m</sub>*表示物料*m*的单位订货成本; *IC<sub>m</sub>*表示物料*m*的单位库存成本.则*t*时刻的项目总订货成本*TOC<sub>t</sub>*、项目总库存成本*TIC<sub>t</sub>*可以分别表示为以下形式:

$$TOC_t = \min \left( \sum_{m=1}^M y_{mt}, 1 \right) \cdot OC_m,$$

$$TIC_t = I_{mt} \cdot IC_m.$$

*g<sub>t</sub>(k)*表示*t*时刻所使用可更新资源的成本,主要涉及

到持有已完工活动的成本.一项活动得以完工除了需要物料的投入外,还涉及劳动力和设备资源的使用,而且这些成本只有当项目完工交货、收到付款后才可收回,因此,可以用持有已完工活动的成本来表示可更新资源的成本.

净现值最大化的目标函数见式(2).其中:*e<sub>i</sub>*表示活动*i*的最早可开始时间, *l<sub>i</sub>*表示活动*i*的最晚可开始时间; *f<sub>i</sub>(x<sub>it</sub>) · (P/F, r%, t)*表示活动*i*的现值流入,主要包括完成活动*i*的奖励和活动*i*的价值等; *g<sub>i</sub>(x<sub>it</sub>) · (P/F, r%, t)*表示活动*i*的现金流出,主要包括完成活动*i*所需资源的相关成本和管理成本等.

环境影响最小化的目标函数见式(3),其中 $EF_{mt}$ 表示项目执行中订购物料 $m$ 在 $t$ 时刻对环境造成的影响<sup>[29-30]</sup>.

1.2.2 时间最小化(PSMOP-T)

时间最小化目标体现在两个方面:项目工期和拖延时间.表2给出了PSMOP-T所对应的典型目标函数.

表2 PSMOP-T的典型目标函数

优化目标	目标函数	公式序号	主要文献
总工期最短	$\min \sum_{t=1}^T t \cdot x_{nt}$	(4)	[17, 24, 31]
总拖期最小	$\min \sum_{i=1}^n w_i TD_i$	(5)	[32]

项目总工期最短的目标函数见式(4),总拖期最小化的目标函数见式(5).其中: $w_i$ 为活动 $i$ 的权重, $TD_i$ 为活动 $i$ 的总延迟时间.

1.2.3 鲁棒性最大化(PSMOP-R)

由于市场环境快速变化,现代项目(如基础设施建设、工程建设、面向订单的生产、维修服务等)所涉及的不确定性因素日益增多.不确定性因素通常

来源于项目本身(如设计变更、交货期改变、活动工期估计不准确等)和物料供应(如可用资源出现故障或短缺、物料延迟到达或质量不过关等),经常会对预先确定的计划方案在实施中产生严重甚至破坏性的干扰.因此,为了生成抗干扰能力强的项目调度与物料供应协调计划,有学者以最大化项目鲁棒性为目标构建PSMOP模型,表3给出了PSMOP-R所对应的典型目标函数.

表3 PSMOP-R的典型目标函数

优化目标	目标函数	公式序号	主要文献
鲁棒性最大	$\max \sum_{i=1}^n NS_i TS_i$	(6)	[22-23]
	$\max \sum_{i=1}^n FS_i$	(7)	[24]

1.3 研究分类

针对不同类别的PSMOP集成优化问题,已有众多有效的方法被相继提出.根据是否考虑不确定因素,将PSMOP相关研究文献归纳为表4,第2节将从确定性环境和不确定性环境两个方面对相关研究成果进行详细评述.

表4 项目调度与物料订购集成优化研究文献分类

问题特征	确定性环境		不确定性环境	
	单个供应商	多个供应商	单个供应商	多个供应商
数量折扣	[16-19, 33-34]	[27-30, 35]		
时间-资源多模式	[11, 19, 36]			
空间约束	[31, 34]		[21, 23-24]	[5, 22, 37]
环境影响		[29-30]		
其他	[7-9, 14-15, 20, 25-26]	[32]		

2 确定条件下的PSMOP问题研究

PSMOP的研究最先是基于确定条件展开的.由于传统的解决项目调度问题的关键路径法未整合物料需求信息,可能使得物料订购决策失误、项目延期完工等,最终导致项目调度计划不能达到最优.因此,Aquilano等<sup>[7]</sup>和Smith-Daniels等<sup>[8]</sup>在关键路径法基础上考虑了物料需求计划,提出了CPM-MRP调度求解方法,这是项目调度与物料订购集成问题的开创性研究.CPM-MRP方法将物料订购的提前期和物料实时库存水平整合到项目调度计划中,以减少因物料短缺而造成的项目延期,从而抑制项目成本的上升.进一步,Smith-Daniels等<sup>[14]</sup>考虑物料库存成本、订购成本、已完成活动持有成本以及项目延期惩罚成本,以总成本最小为目标,首次建立了PSMOP集成优化问题混合整数规划(mixed integer programming, MIP)模

型,研究表明,在活动时间确定的情况下,将该问题分解为两个子问题可以分别求解得到最优的项目调度计划(活动开始时间为其最晚可开始时间)和最优的物料订购计划.

部分学者针对项目执行需要用到可更新资源的情况,将可更新资源供给量限制加入模型约束条件,即在任意时刻 $t$ 所有正在执行的活动资源消耗量之和不超过可更新资源的总量.例如,Dodin等<sup>[9]</sup>将可更新资源限定为昂贵、高度专业化的设备,考虑活动赶工成本、设备启动/转换和闲置成本、操作员加班成本、已完成活动持有成本以及项目提前完工奖励/延期惩罚,建立了MIP模型,并采用启发式算法求解得到最优集成调度计划.Shahsavvar等<sup>[16]</sup>将物料订购问题(不可更新资源)与资源投资问题(可更新资源)相结合,构建了总成本最小化模型,其中成本包括物料

订货成本、库存成本、物料成本以及可更新资源使用成本. Kazemi等<sup>[33]</sup>提出可更新资源均衡与物料订购集成优化问题,以项目工期最短和总成本最小为目标,构建了一个双目标优化模型.

在持续时间较长的项目中,项目的价值成为一项重要的绩效指标,因此,有学者开始在项目调度与物料订购集成优化问题中关注项目的净现值(net present value, NPV). 例如, Smith-Daniels等<sup>[25]</sup>以最大化项目净现值为优化目标,运用CPM-MRP方法为可更新资源受限的项目构建最晚开始时间计划和物料订购计划,基于3种活动优先规则开发了相应的启发式求解算法. Smith-Daniels等<sup>[26]</sup>同时考虑资金和物料成本及约束的影响,提出了一种解决项目调度问题的新方法,在预算和物料约束条件下安排项目活动、物料、人力和设备等,以寻求项目净现值最大化. 这种建模方法的主要优点在于允许决策者对项目的现金流进行权衡优化. 其中:正现金流包括每完成一项活动时,客户支付的进度款;负现金流包括库存持有成本、物料订购成本、活动执行期间产生的额外费用以及因项目延期而导致的罚款等. Asadujjaman等<sup>[27]</sup>针对折现现金流PSMOP问题,以最大化项目净现值为目标建立了一个MIP优化模型,模型的决策变量包括活动开始/结束时间、物料订购时间、从每个供应商处以价格折扣订购每种资源的数量、仓库库存及运输库存数量.

随着PSMOP研究的深入推进,学术界不断对PSMOP模型进行拓展以增加其应用价值,主要涉及物料订购的数量折扣、时间-资源多模式权衡、物料存储空间约束、环境影响等方面.

### 2.1 物料订购数量折扣

现实中多数项目都涉及大量的物料需求,比如建筑工程项目一般需要用到多种类型的建筑材料,此时管理者可以采用不同的物料订购策略,比如在项目执行开始前采购所有物料,或者在每个活动执行开始前订购该活动所需物料,或者采用介于二者之间的混合订购策略. 显然,在这种情况下,项目管理者需要在物料订购成本与持有成本之间进行权衡,这就涉及到不同数量折扣下的批量订购决策.

Dodin等<sup>[17]</sup>考虑单个供应商订货达到一定程度时的数量折扣因素及其对项目进度和成本的影响,将活动持续时间和订货批量作为决策变量,建立了项目调度与物料订购集成优化模型. 该研究通过考虑多种项目成本发现,该问题存在一个最优的项目调度计划:要么尽可能早开始(从零时刻开始),要么尽可能

晚完成. 该项研究考虑了订购折扣及活动可变工期,提升了调度灵活性,并且进一步降低了项目总成本或工期,使得集成优化问题的建模和求解更加高效.

此外, Shahsavar等<sup>[16,18]</sup>在项目可更新资源受限的情况下考虑物料采购的总数量折扣,建立了一个MIP优化模型. Tabrizi等<sup>[28-29]</sup>研究了面向多个物料供应商的PSMOP集成优化问题,分别提出了全单位数量折扣(all-unit discount)策略和增量价格折扣(incremental discount)策略. Tabrizi等<sup>[34]</sup>对多个供应商的不同物料折扣策略进行了分析与权衡,认为这是降低项目采购成本的关键.

### 2.2 活动时间-资源多模式

以上研究都假设项目中每个活动具有固定不变的执行时间以及所需资源量,即活动为单模式. 而在实际项目中,一个活动往往具有多个执行模式,不同模式下执行时间和所需要的资源量不相同. 例如某活动需要40人-天来完成,那么既可以安排4人10天完成,也可以安排5人工作8天,确保40人-天的工作量被完成. 因此,部分学者针对这种多模式资源受限项目调度与物料订购集成优化问题进行研究,这就增加了决策变量的维度和相应问题的求解难度. 例如: Fu<sup>[11]</sup>针对建筑工程项目,考虑多模式项目调度和批量订货策略,建立了优化模型以权衡各种项目成本,包括可更新资源使用成本、物料成本、订货成本、缺货成本、库存成本以及项目提前完工奖励/延期惩罚成本; Zoraghi等<sup>[36]</sup>、Akhbari<sup>[19]</sup>分别提出了包含奖惩策略的多模式PSMOP模型,模型均以最小化总成本为优化目标,其中成本包括物料订货成本、库存持有成本以及项目提前完工奖励/延期惩罚.

### 2.3 物料存储空间约束

对于工程项目而言,工程建设涉及的许多要素(材料、人、设备等)以及工程构件本身都需要占据一定的空间,由于活动空间干涉而导致的物料缺货是项目延期的重要因素,工程现场的存储空间容量是工程调度必须重视的问题<sup>[38]</sup>. De Frene等<sup>[39]</sup>针对建筑工程领域,研究了空间资源约束下的项目调度问题. 对于PSMOP集成优化问题, Tabrizi等<sup>[34]</sup>考虑了物料的存储空间约束,即在任意时刻 $t$ 所有物料占用的存储空间之和不超过项目现场所能提供的总空间容量;同时考虑到活动时间可压缩性(可变)和物料订购数量折扣因素,构建了相应的MIP优化模型,目标为最小化项目总成本,包括活动工期压缩成本、项目提前完工奖励/延期惩罚成本、活动价值、物料订购费用、物料采购成本和持有成本. Zhang等<sup>[31]</sup>基于有限

的物料存储空间,以最短化项目工期和最小化总成本为优化目标,构建了确定性环境下的双目标PSMOP模型.

## 2.4 环境影响

进入21世纪后,可持续发展逐渐成为社会主流观念,在现有PSMOP模型中考虑环境限制与社会效益成为新的研究热点. Tabrizi<sup>[29]</sup>深入分析了物料订购对环境的影响,定义了生态因子(ec-factor, EF)的概念,用 $EF_{mt}$ 表示项目执行中订购物料 $m$ 在 $t$ 时刻对环境造成的影响;同时考虑最小化总成本和最小化环境影响,建立了问题双目标MIP优化模型,鼓励项目承包商向环保等级高、社会信誉好的供应商订货,督促供应商不仅追求经济效益,还要积极改善社会和环保绩效. 此外, Habibi等<sup>[30]</sup>建立了一个两阶段的物料订购与项目调度集成优化框架:第1阶段对潜在供应商的环保等级和社会价值进行量化;第2阶段以最大化项目净现值、最大化环保等级、最大化社会效益为目标建立了问题多目标优化模型,并设计了两种启发式算法求解问题.

以上PSMOP相关研究都是针对单项目管理环境,对于多项目协调的理论研究目前还非常有限. 据笔者所知,只有Chen等<sup>[32]</sup>研究了物料供应商选择和分布式多项目调度的协调优化问题,以所有项目的总加权拖期成本最小化为目标建立MIP模型,通过将模型分解为若干子问题进行求解,设计了相应的启发式算法. 有数据显示,在世界范围内高达90%的项目管理都是在多项目环境下执行的<sup>[40]</sup>,因此,多项目调度与物料订购集成优化问题是未来研究值得关注的重点内容.

## 3 不确定条件下的PSMOP问题研究

在当今竞争日益激烈且快速变化的市场环境下,项目面临的不确定因素越来越多,这会干扰项目计划的顺利执行. 项目活动一旦中断或延迟开工就会产生额外的成本,而物料需求与项目调度计划密切相关. 鉴于此,部分学者开始研究不确定环境下的PSMOP集成优化问题,以期生成抗干扰能力强的项目调度与物料供应协调计划. PSMOP集成优化领域处理不确定性的方法主要划分为4类,即时间缓冲方法、随机规划方法、鲁棒优化方法、鲁棒性指标优化方法.

### 3.1 时间缓冲方法

通过在项目活动之前插入时间缓冲来吸收和缓解不确定因素对调度方案的影响,增强计划的鲁棒性<sup>[41]</sup>. Zhang等<sup>[21]</sup>针对活动时间不确定因素,以最小

化项目总成本(包括物料库存成本、订购成本、已完成活动持有成本和活动开始时间偏离惩罚成本)为目标,设计了一种两阶段PSMOP集成优化方法:第1阶段先求解活动时间确定条件下的最优方案;第2阶段通过在第1阶段得到的基准调度计划中插入时间缓冲,最终获得可以有效应对活动时间波动的鲁棒项目调度计划和相应的物料订货计划. 卢辉等<sup>[5]</sup>考虑工程建设材料供应的不确定性与需求的非平稳性,以最小化项目总工期奖惩费用、施工活动开始时间偏离惩罚成本以及材料库存持有成本之和为目标,构建了项目调度与材料供应集成优化模型,设计了基于代理优化模型的优化方法,通过在项目活动之间设置时间缓冲,获得不确定条件下使得总成本最优的项目调度、材料安全库存设置以及分拨决策. 此外,关键链缓冲管理方法(critical chain scheduling/buffer management, CC/BM)因其考虑了可更新资源约束和工期不确定性来改善项目计划,更符合实际需求而广泛地应用于项目调度以及PSMOP集成优化领域. Yeo等<sup>[42]</sup>针对物料订购提前期的不确定性,提出了一个结合CC/BM和供应链管理的概念框架模型,以分析物料的供应策略. 在此基础上, Yeo等<sup>[43]</sup>进一步构建了一种关键供应链管理(critical supply chain management, CSCM)模型,使用关键链缓冲管理方法来应对物料采购提前期的不确定性.

### 3.2 随机规划方法

该方法采用概率分布描述参数的不确定性,通常是以系统的期望性能为优化目标,或者通过概率形式描述模型约束条件. 随机规划问题通常是非凸的,并且事件概率往往难以直接计算,为问题的有效求解带来巨大挑战. Xu等<sup>[37]</sup>针对物料延迟时间随机的重复性项目环境,建立了项目驱动的供应链模型(project-driven supply chain, PDSC), PDSC是一个多阶段随机规划模型,在第1阶段作出物料的安全库存决策,在后续阶段物料延迟实际发生时动态作出相应的活动赶工决策. Sha等<sup>[44]</sup>针对车间作业调度与物料订购联合优化问题,同时考虑工序执行时间及资源需求的不确定性,以最小化期望总调度成本为目标,建立了一个多阶段随机规划模型.

### 3.3 鲁棒优化方法

通过不确定集来描述参数的不确定性,在此基础上,对于不确定集内可能产生的最坏情形进行优化. Tabrizi等<sup>[22]</sup>针对从多个供应商处采购物料的情况,通过不确定集的方式综合考虑活动执行时间和资源成本两个方面的不确定性,建立了一个双目标

PSMOP鲁棒优化模型. 该方法的优点是不依赖于不确定参数的概率分布,相较于随机规划其复杂程度更低、更易处理;其缺点是为了保证解的可行性,面向最坏情形进行优化,使得方法相对保守.

### 3.4 鲁棒性指标优化方法

一般基于确定型模型,通过研究基准方案的鲁棒性,使不确定因素对方案执行的影响最小化. 例如: Tabrizi等<sup>[23]</sup>以项目总成本最小和调度方案鲁棒性最大(以活动总时差衡量)为目标,构建了相应的双目标MIP优化模型; Zoraghi等<sup>[24]</sup>研究了多模式项目调度与考虑数量折扣的物料订购集成优化问题,以项目完工期最短、调度方案鲁棒性最大(以活动自由时差衡量)、总成本最小为目标,构建了多目标优化模型.

可以看出,针对不确定环境下的PSMOP研究尚处于起步阶段,目前的研究仍然存在诸多不足. 例如: 文献[23-24]并没有显性考虑不确定性,而是采用基于时差的鲁棒性替代目标构建优化模型; 文献[5, 21, 37]依赖于对不确定参数较强的假设限定,需要给定活动工期、物料供应率或采购提前期的具体概率分布,而对于实际计划与调度问题,很难依靠有限的历史数据给出准确的参数概率分布. 因此,现有文献所涉及的优化理论方法尚十分有限,需要进一步探索新的模型与方法来处理不确定环境下的PSMOP问题.

## 4 求解算法

项目调度与物料订购集成优化问题属于NP难问题<sup>[14,17]</sup>,设计各种有效的求解算法是PSMOP的研究热点和难点. 根据是否可以得到最优解,PSMOP的求解算法分为精确算法和启发式算法两类. 精确算法的优点是可以求出理论上的最优解,但求解大规模问题时需要消耗大量的计算时间和资源,这方面研究非常少见.

启发式算法主要划分为基于规则的启发式算法和元启发式算法(智能优化算法)两类. 启发式算法虽然可能只能得到问题的近似最优解或可行解,并且难以评估解的质量,但可以大幅提高求解效率,满足实际应用需求. 一方面,基于规则的启发式算法针对具体问题,借助经验探寻合适的求解规则,采取不同的优先规则会得到不同的解. 最初,Smith-Daniels等<sup>[8]</sup>以总成本最小为优化目标构建了一个CPM-MRP模型,为有效求解模型,设计了一种并行单程启发式算法,采用最小时差优先规则为项目活动分配资源,在活动优先关系约束、不可存储资源供应量约束、物料提前期及库存约束条件下,获取项目的最早开始时间计划和物料需求计划. Smith-Daniels

等<sup>[26]</sup>为优化项目净现值,基于3种活动优先级规则开发了相应的启发式算法,运用CPM-MRP方法为可更新资源受限的项目构建了最晚开始时间计划和物料订购计划. 其中:第1种优先级规则是基于项目最早开始时间计划选择具有最晚结束时间的活动;第2种优先级规则是选择具有最晚开始时间的活动;第3种优先级规则是选择编号最小的活动. Dodin等<sup>[9]</sup>针对中小规模项目实例,采用CPLEX求解考虑可更新资源受限的集成优化问题模型;针对大规模项目算例,设计了一种“增强的前向加载(enhanced forward loading)”启发式算法来获得高质量的可行计划,并将可行计划所对应的目标函数值(作为上界)用于加快CPLEX求解过程.

另一方面,综合不同领域知识的元启发式算法为求解优化问题提供了通用的算法框架,其通常能在可接受的时间内求得大规模问题的满意解(甚至最优解). 在项目管理实践中,决策者往往希望在适当的时间内得到可行解,因此,现有针对PSMOP的文献绝大多数都采用元启发式算法求解. 表5列出了求解PSMOP的元启发式算法研究工作.

表5中各算法符号说明:

遗传算法(genetic algorithm, GA);

模拟退火算法(simulated annealing, SA);

粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO);

变邻域搜索算法(variable neighbourhood search, VNS);

和声搜索算法(harmony search, HS);

动态规划(dynamic programming, DP);

免疫算法(immune algorithm, IA);

非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II);

强度帕累托进化算法(strength Pareto evolutionary algorithm II, SPEA-II);

多目标粒子群优化算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO);

基于分解的多目标进化算法(multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition, MOEA/D);

多目标差分进化算法(multi-objective differential evolution, MODE);

候鸟优化算法(migrating birds' optimization algorithm, MBOA);

多目标减振优化算法(multi-objective vibration damping optimization, MOVDO).

表5 PSMOP模型主要优化目标及其求解算法

文献	目标函数类别					算法
	总成本最小	净现值最大	环境影响最小	项目工期最短	鲁棒性最大	
卢辉等 <sup>[5]</sup> ; Sajadieh等 <sup>[10]</sup>	✓					GA
Fu <sup>[11]</sup>	✓					HS-GA
Zoraghi等 <sup>[15]</sup>	✓					GA-SA
Zoraghi等 <sup>[20]</sup>	✓					SA-GA
Shahsavari等 <sup>[18]</sup>	✓					GA-PSO
Shahsavari等 <sup>[16]</sup>	✓					GA-DP, GA-SA, GA-PSO
Asadujjaman等 <sup>[27]</sup>		✓				GA-IA
Tabrizi等 <sup>[28]</sup>		✓				GA
Tabrizi等 <sup>[34]</sup>		✓				GA-VNS
Zoraghi等 <sup>[36]</sup>	✓					PSO-GA, GA-GA, SA-GA
Zhang等 <sup>[21]</sup>	✓				✓	GA
Tabrizi等 <sup>[23]</sup>	✓				✓	$\epsilon$ -constraint
Zoraghi等 <sup>[24]</sup>	✓			✓	✓	NSGA-II, SPEA-II, MOPSO, MOEA/D
Tabrizi等 <sup>[22]</sup>	✓				✓	NSGA-II, MODE
Tabrizi <sup>[29]</sup>	✓		✓			NSGA-II, MBOA
Zhang等 <sup>[31]</sup>	✓			✓		NSGA-II
Habibi等 <sup>[30]</sup>		✓	✓			NSGA-II, MOPSO
Kazemi等 <sup>[33]</sup>	✓			✓		NSGA-II, MOVDO

首先,求解项目调度与物料订购集成优化问题,应用最为广泛的元启发式算法是遗传算法GA,其基本思想是对活动调度计划和物料订购决策进行混合编码,采用随机启发式方法构建初始解种群;然后设计选择、交叉、变异算子,基于迭代进化思想搜索最优解。例如,卢辉等<sup>[5]</sup>考虑供应的不确定性和需求的非平稳性,提出了基于代理模型的优化方法来求解项目调度与材料供应集成优化模型,设计了遗传算法求解模型,采用“活动优先顺序-时间缓冲大小-材料库存水平”列表的混合实数编码方式,并运用锦标赛策略、算数交叉算子以及高斯变异算子来生成子代种群,从而减少计算成本,提高优化效率。Tabrizi等<sup>[28]</sup>采用“活动结束时间-供应商选择-物料订购时间”矩阵对GA中染色体进行编码,讨论了如何生成初始可行解的预处理方法。

其次,从表5中可以看出,PSMOP问题大多采用“遗传算法+邻域搜索”的混合元启发式求解策略。其基本思想是:第1阶段采用遗传算法对物料订购决策进行优化;第2阶段基于物料订购计划,采用模拟退火、粒子群、变邻域搜索等邻域搜索算法对项目调度计划进行优化。两阶段相互迭代,实现项目调度与物料订购整体优化。例如:Zoraghi等<sup>[20]</sup>以SA为外循环寻找合适的项目调度计划,以GA为内循环寻找最优的物料订购计划。Zhang等<sup>[21]</sup>研究了具有不确定活动持续时间的PSMOP问题,并提出了一种两

阶段求解方法:第1阶段是在确定性环境下运用GA得到总成本最小化的项目基准调度计划,其中GA采用“活动开始时间-物料订购时间”的编码方式;第2阶段设计迭代算法确定时间缓冲插入的位置和大小,并制定相应的物料订货计划。Shahsavari等<sup>[16]</sup>针对资源投资与物料订购集成优化模型设计了3种混合智能算法,实验结果表明:对于可以采用优化软件求得最优解的小规模问题,GA-DP算法可以获得最优的求解效果,但是其在求解大规模问题的时间性能表现差强人意;GA-SA算法的综合绩效表现优秀,即使面对大规模问题也可以在较短时间内得到满意的结果。Tabrizi等<sup>[34]</sup>则利用VNS对GA进行了改进,以提高GA求解效率。总之,现有PSMOP算法的研究中,基于活动优先顺序和物料订购时间混合编码的遗传算法性能较优,尤其是在项目网络复杂度和资源强度较低条件下。同时,结合不同元启发式算法(特别是GA)优势的混合智能算法往往能获得比单一算法更优的解。

针对多目标PSMOP,学者们大多采用经典的非支配排序遗传算法NSGA-II求解。其基本思想是针对目标向量,定义解的支配关系,算法根据解的支配和非支配关系对解集进行分层,通过选择、交叉、变异得到非支配解集,使好的解有更大的机会遗传到下一代。Zoraghi等<sup>[24]</sup>以项目完工工期最短、调度方案鲁棒性最大以及总成本最小为目标建立多目标优化模

型,提出了4种求解算法,大规模仿真实验结果表明了NSGA-II相对于其他3种多目标优化算法(SPEA-II, MOPSO和MOEA/D)的优越性. Tabrizi等<sup>[22]</sup>针对其构建的PSMOP双目标优化模型设计了两种求解算法,研究结果表明,NSGA-II在求解小规模问题时更为有效,而MODE更适合于求解大规模问题. 随着研究的推进,学者们不断开发出新的算法以寻求最优的项目调度及物料订购协调计划,如Tabrizi<sup>[29]</sup>设计的MBOA算法、Kazemi等<sup>[33]</sup>提出的MOVDO算法等.

## 5 应用领域

PSMOP问题的研究来源于实践,研究成果应用于实践,同时,项目管理实践需求也在不断牵引着PSMOP理论研究创新发展. PSMOP的提出最初是为了解决项目调度与物料订购不同步、不协调而产生的超额成本的问题,研究成果可以为决策者制定有效的项目调度与物料供应协同计划提供优化方法,为在项目范围内实现资源优化配置提供可行方案,尽量消除或避免项目实施过程中的各种等待、瓶颈及非增值环节,以提高各业务活动的连贯性和协调性. 随着PSMOP研究的深入,其研究范围不断拓展,在基础设施建设、工程建筑、大型复杂产品制造与装配、供应链管理等领域都得到了广泛的应用<sup>[11,32,37]</sup>.

Eliman等<sup>[45]</sup>针对汽车电池供应链背景下的产品生产与分销,其中供应链需要承担包括信息和货物在多个生产和分销单元间流动在内的相当数量的活动,如发送和接收订单、处理订单、发送和接收货物及其优先级等,将该问题抽象建模为相应的PSMOP,进而对库存持有成本、活动赶工成本、运输成本、延期交付罚金等进行权衡,找到最优解决方案.

胡鑫铭等<sup>[46]</sup>以飞机移动生产线为实际背景,将作业装配过程调度抽象为RCPSP问题并进行了扩展,引入物料配送与线边存储决策以及相关能力约束等实际因素,建立了以装配总工期最短为目标的更新资源受限型PSMOP数学模型,设计了一种以遗传算法为框架的启发式求解算法. 陆志强等<sup>[47]</sup>将PSMOP模型应用于解决飞机移动生产线中作业物料的供给问题,在物料组批和车辆调度的基础上引入空箱的回收决策,构建了飞机移动生产线物料配送与空箱回收集成优化模型,目标为最小化车辆出行次数.

王红卫等<sup>[48]</sup>探讨了重大工程项目预制件资源生产与装配的协同调度,该问题既要考虑预制件生产和供应的合理性,又要考虑现场装配的进度计划和工程进度,并随时响应现场预制件装配过程中的变化,使

预制件既不会因为订购过早而产生较高库存成本、也不会因为订购过晚而延误工期. 作者将该问题归结为考虑提前/拖期的PSMOP问题,分别考虑确定时间点、单时间窗和多时间窗3种交货期类型,建立了不同的优化调度模型,并进行了求解分析.

## 6 结论与展望

PSMOP具有重要的理论价值和紧密的实践相关性,因此受到了学术界的广泛重视,吸引了众多学者对其进行深入研究,并提出了一系列行之有效的模型与优化算法,PSMOP的扩展问题与应用领域也在不断延伸. 通过对现有文献的分析可以发现,项目调度与物料订购的集成优化领域仍然有许多有意义的问题值得研究,归纳为如下几个方面:

1) 在问题特征方面,目前绝大多数集成优化研究都是针对“单供应商-单项目”管理环境. 随着现代经济社会的不断发展,企业将更多地面临多项目管理的挑战;项目群整体运作通常需要从多个供应商获取多品种物料,为了获得规模效益、降低成本,需要以集中的方式对物料的采购、运输和分配实施全面管控. 针对这种“多供应商-多项目”问题特征,如何对项目群调度决策和物料订购决策进行协调优化,这方面的理论工作还很有限,未来的研究工作有必要重点关注.

其次,现有PSMOP研究大多关注于实现项目总成本最低,而实践中决策者通常需要兼顾时间、收益等多个管理目标(例如项目净现值与工期之间具有怎样的权衡关系),研究PSMOP多目标优化问题是一个值得持续探索的课题.

此外,不确定条件下的PSMOP研究尚处于起步阶段,现有研究主要针对项目活动执行时间和物料订购提前期的不确定性,而对于物料供应能力、可更新资源可用量等方面的不确定性还鲜有研究.

2) 在模型方面,研究PSMOP问题的规范化描述与建模是基础与核心工作. 针对确定性问题,未来仍需要考虑诸多复杂因素和约束条件进行高效的数学描述,建立便于问题求解的数学规划模型. 对于不确定性问题,需要针对现实中不确定参数的实际特点,采用不同的建模描述方法. 例如:对于历史数据相对准确完善、不确定参数概率分布已知的情况,可以建立随机规划模型;对于不确定参数概率分布不明确的情况,可以建立鲁棒或者分布式鲁棒优化模型. 因此,不确定条件下的PSMOP问题是一个亟待探索和具有广阔前景的研究方向.

3) 在算法方面,由于项目调度与物料订购集成优

化问题决策变量众多、约束条件复杂,是一个NP难的组合优化问题,设计新型、高效的求解算法将始终是这一领域的重要研究课题.针对小规模PSMOP,有必要探索相应的精确算法以获得问题最优解.针对大规模问题,未来的研究应不断丰富PSMOP的智能优化算法,同时根据模型特性探寻相应的基于规则的启发式算法,致力于开发更加简便、有效的混合优化算法,研究新的编码与解码方式、智能搜索算子等.

此外,现有PSMOP研究尚缺乏统一的标杆测试问题库,部分学者采用单一案例或者小规模算例,无法充分说明算法的适用性和可推广性.因此,今后的研究设计应进一步重视对算法的计算性能分析,开发一个设计良好的PSMOP标准问题库,或者采用大型的、多元化的真实项目案例库,将会极大推动本领域的发展.

4) 在应用方面,PSMOP现有研究成果仍主要集中在模型与算法方面,具有实际项目背景的应用研究较少.因此,未来的研究需进一步注重解决特定领域的实际优化问题.例如,针对日益风靡的装配式建筑工程项目,研究PSMOP可为多品种预制构件的生产供应和施工作业计划的协同提供解决方案.又如,针对突发事件应急救援项目(如2019-2020年全球范围内爆发的COVID-19疫情),救援活动中多地医院既需要可更新资源(如医护人员、病房、呼吸机等),同时需要大量消耗不可更新资源(如口罩、防护服、药品、检测试剂等物资),需要从全国甚至全球各地的生产商寻求供应<sup>[49-50]</sup>.将此问题归结为PSMOP,研究如何协调规划医疗物资供应和制定应急救援预案,以在最短时间内达到最佳救援效果,这方面的研究值得期待.

另外,在项目管理领域已有多种管理软件(如Microsoft Project、Primavera Project Planner等),为项目决策者提供了可靠的进度、成本等的分析工具.未来若将现有的PSMOP模型及算法整合入相应的程序与软件包,从而为企业高层管理人员协调物料订购与项目调度计划提供决策支持,具有重要的现实意义,这将有助于进一步提高管理者的整体决策水平和项目的成功率.

5) 针对项目计划在执行阶段的动态调整和控制方面,尚未见到与集成物料供应相关的研究.实际上,即使充分考虑了各种不确定性因素制定了具有抗干扰能力的鲁棒调度计划与物料供应计划,但由于实际中各种突发情况的存在,项目执行过程中出现物料短缺往往不可避免,常常需要采取临时调配紧急资源等措施.因此,项目执行过程中,如何根据多个供应商的

供应能力以及各项目的物料储备,对物料进行有效的协同调配,并与集成的计划体系之间建立灵活、可靠的反馈和互动机制,是值得关注的课题.

#### 参考文献(References)

- [1] 陶莎, 盛昭瀚, 徐峰. 项目调度与多尺度资源配置的集成优化[J]. 管理工程学报, 2018, 32(1): 204-211.  
(Tao S, Sheng Z H, Xu F. Integrated optimization of project scheduling and multi-scale resource allocation problem[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2018, 32(1): 204-211.)
- [2] 王峰, 韩孟臣, 赵耀宇, 等. 基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 669-676.  
(Wang F, Han M C, Zhao Y Y, et al. An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem[J]. Control and Decision, 2021, 36(3): 669-676.)
- [3] Safa M, Shahi A, Haas C T, et al. Supplier selection process in an integrated construction materials management model[J]. Automation in Construction, 2014, 48: 64-73.
- [4] Chen S, Lee H. Incentive alignment and coordination of project supply chains[J]. Management Science, 2017, 63(4): 1011-1025.
- [5] 卢辉, 王红卫, 李锋, 等. 考虑供应不确定性与需求非平稳性的项目调度与材料供应集成优化[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(3): 647-658.  
(Lu H, Wang H W, Li F, et al. Integrated scheduling and material supply planning under nonstationary stochastic demand and random supply yield[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(3): 647-658.)
- [6] 祁超, 卢辉, 王红卫, 等. 重大工程工厂化建造管理创新: 集成化管理和供应商培育[J]. 管理世界, 2019, 35(4): 39-51.  
(Qi C, Lu H, Wang H W, et al. Management innovation of offsite construction in mega projects: Integrated management and supplier development[J]. Management World, 2019, 35(4): 39-51.)
- [7] Aquilano N J, Smith D E. A formal set of algorithms for project scheduling with critical path scheduling/material requirements planning[J]. Journal of Operations Management, 1980, 1(2): 57-67.
- [8] Smith-Daniels D E, Aquilano N J. Constrained resource project scheduling subject to material constraints[J]. Journal of Operations Management, 1984, 4(4): 369-387.
- [9] Dodin B, Elimam A A. Integration of equipment planning and project scheduling[J]. European Journal of

- Operational Research, 2008, 184(3): 962-980.
- [10] Sajadieh M, Shadrokh S, Hasanzadeh F. Concurrent project scheduling and material planning: A genetic algorithm approach[J]. *Scientia Iranica*, 2009, 16(2): 91-99.
- [11] Fu F. Integrated scheduling and batch ordering for construction project[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(2): 784-797.
- [12] Chan C T W, Pasquire C. An analysis for the degree of accuracy in construction project indirect costs[J]. *The Journal of Cost Analysis & Management*, 2004, 6(1): 46-66.
- [13] Goh J, Hall N G. Total cost control in project management via satisficing[J]. *Management Science*, 2013, 59(6): 1354-1372.
- [14] Smith-Daniels D E, Smith-Daniels V L. Optimal project scheduling with materials ordering[J]. *IIE Transactions*, 1987, 19(2): 122-129.
- [15] Zoraghi N, Najafi A A, Niaki S T A. Resource constrained project scheduling with material ordering: Two hybridized meta-heuristic approaches[J]. *International Journal of Engineering*, 2015, 28(6): 896-902.
- [16] Shahsavar A, Zoraghi N, Abbasi B. Integration of resource investment problem with quantity discount problem in material ordering for minimizing resource costs of projects[J]. *Operational Research*, 2018, 18(2): 315-342.
- [17] Dodin B, Elimam A A. Integrated project scheduling and material planning with variable activity duration and rewards[J]. *IIE Transactions*, 2001, 33(11): 1005-1018.
- [18] Shahsavar A, Abbasi B, Zoraghi N. Material ordering with discount policy integrated with a project scheduling problem[C]. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Singapore, 2015: 1223-1226.
- [19] Akhbari M. Integration of multi-mode resource-constrained project scheduling under bonus-penalty policies with material ordering under quantity discount scheme for minimizing project cost[J]. *Scientia Iranica*, 2020: 1-44.
- [20] Zoraghi N, Najafi A A, Niaki S T A. An integrated model of project scheduling and material ordering: A hybrid simulated annealing and genetic algorithm[J]. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 2012, 10: 19-27.
- [21] Zhang Y, Cui N F, Hu X J, et al. Robust project scheduling integrated with materials ordering under activity duration uncertainty[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2020, 71(10): 1581-1592.
- [22] Tabrizi B H, Ghaderi S F. A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 98: 11-29.
- [23] Tabrizi B H, Ghaderi S F. A bi-objective model to address simultaneous formulation of project scheduling and material ordering[J]. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 2015, 9(11): 1969-1972.
- [24] Zoraghi N, Shahsavar A, Niaki S T A. A hybrid project scheduling and material ordering problem: Modeling and solution algorithms[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 58: 700-713.
- [25] Smith-Daniels D E, Aquilano N J. Using a late-start resource-constrained project schedule to improve project net present value[J]. *Decision Sciences*, 1987, 18(4): 617-630.
- [26] Smith-Daniels D E, Smith-Daniels V L. Maximizing the net present value of a project subject to materials and capital constraints[J]. *Journal of Operations Management*, 1987, 7(1/2): 33-45.
- [27] Asadujjaman M, Rahman H F, Chakraborty R K, et al. Resource constrained project scheduling and material ordering problem with discounted cash flows[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 158: 107427.
- [28] Tabrizi B H, Ghaderi S F, Yakhchali S H. Net present value maximisation of integrated project scheduling and material procurement planning[J]. *International Journal of Operational Research*, 2019, 34(2): 285-300.
- [29] Tabrizi B H. Integrated planning of project scheduling and material procurement considering the environmental impacts[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 120: 103-115.
- [30] Habibi F, Barzinpour F, Sadjadi S J. A mathematical model for project scheduling and material ordering problem with sustainability considerations: A case study in Iran[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 690-710.
- [31] Zhang Y, Cui N F. Project scheduling and material ordering problem with storage space constraints[J]. *Automation in Construction*, 2021, 129: 103796.
- [32] Chen W W, Lei L, Wang Z W, et al. Coordinating supplier selection and project scheduling in resource-constrained construction supply chains[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(19): 6512-6526.
- [33] Kazemi S, Davari-Ardakani H. Integrated resource leveling and material procurement with variable execution intensities[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 148: 106673.

- [34] Tabrizi B H, Ghaderi S F. An integrated mixed-integer programming model to address concurrent project scheduling and material ordering[J]. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2015, 9(11): 1960-1963.
- [35] Tabrizi B H, Ghaderi S F. Simultaneous planning of the project scheduling and material procurement problem under the presence of multiple suppliers[J]. *Engineering Optimization*, 2016, 48(9): 1474-1490.
- [36] Zoraghi N, Shahsavari A, Abbasi B, et al. Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with material ordering under bonus-penalty policies[J]. *TOP*, 2017, 25(1): 49-79.
- [37] Xu X, Zhao Y, Chen C Y. Project-driven supply chains: Integrating safety-stock and crashing decisions for recurrent projects[J]. *Annals of Operations Research*, 2016, 241(1/2): 225-247.
- [38] Said H, El-Rayes K. Optimal utilization of interior building spaces for material procurement and storage in congested construction sites[J]. *Automation in Construction*, 2013, 31: 292-306.
- [39] De Frene E, Schatteman D, Herroelen W, et al. A heuristic methodology for solving spatial resource-constrained project scheduling problems[J/OL]. Available at SSRN 1089355, 2007.
- [40] 陈俊杰, 同淑荣, 叶正梗, 等. 资源受限多项目调度问题的两阶段算法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 2013-2020.  
(Chen J J, Tong S R, Ye Z G, et al. Two-stage algorithm for resource-constrained multi-project scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(8): 2013-2020.)
- [41] Liang Y Y, Cui N F, Hu X J, et al. The integration of resource allocation and time buffering for bi-objective robust project scheduling[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(13): 3839-3854.
- [42] Yeo K T, Ning J H. Integrating supply chain and critical chain concepts in engineer-procure-construct (EPC) projects[J]. *International Journal of Project Management*, 2002, 20(4): 253-262.
- [43] Yeo K T, Ning J H. Managing uncertainty in major equipment procurement in engineering projects[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(1): 123-134.
- [44] Sha Y, Zhang J L, Cao H. Multistage stochastic programming approach for joint optimization of job scheduling and material ordering under endogenous uncertainties[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 290(3): 886-900.
- [45] Elimam A A, Dodin B. Project scheduling in optimizing integrated supply chain operations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 224(3): 530-541.
- [46] 胡鑫铭, 陆志强. 考虑物料配送的飞机移动生产线调度问题优化[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(12): 2573-2582.  
(Hu X M, Lu Z Q. Optimization of aircraft moving assembly line scheduling problem considering material delivery[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(12): 2573-2582.)
- [47] 陆志强, 曾浚. 飞机移动生产线物料配送与空箱回收集成建模[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(1): 136-142.  
(Lu Z Q, Zeng J. Integrated modeling of material delivery and container pickup problem for aircraft moving assembly line[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2019, 47(1): 136-142.)
- [48] 王红卫, 谢勇, 曾伟. 重大工程现场资源供应的协调与优化[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 155-170.  
(Wang H W, Xie Y, Zeng W. Coordination and optimization of on-site resource supply for major projects[M]. Beijing: Science Press, 2018: 155-170.)
- [49] Lee K, Lei L, Pinedo M, et al. Operations scheduling with multiple resources and transportation considerations[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(23/24): 7071-7090.
- [50] 王艳婷, 何正文, 刘人境. 突发事件应急救援前摄性调度与反应性调度的集成优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(4): 945-954.  
(Wang Y T, He Z W, Liu R J. Integrated optimization of proactive scheduling and reactive scheduling for emergency rescue[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(4): 945-954.)

## 作者简介

胡雪君(1989—),女,副教授,博士,从事项目管理、运营管理、组合优化等研究, E-mail: xuejun\_hu@hnu.edu.cn;

王建江(1986—),男,讲师,博士,从事卫星资源规划调度、项目调度、组合优化等研究, E-mail: jianjiangwang@nudt.edu.cn;

崔南方(1963—),男,教授,博士生导师,从事项目管理、运营管理、供应链管理等研究, E-mail: nfcui@mail.hust.edu.cn;

赖慧玲(1998—),女,硕士生,从事项目调度、物料订购决策的研究, E-mail: 854959859@qq.com.

(责任编辑: 李君玲)