

多目标项目调度研究综述: 复杂系统优化的视角

刘寅斌, 余咪咪, 李洪波, 胡子怡
(上海大学 管理学院, 上海 200444)

摘要: 在项目预算内高质量地及时交付, 是项目的核心目标, 具有天然的多目标属性。作为一类重要的系统优化问题, 多目标项目调度以其重要的理论价值和密切的实践相关性, 受到了学界和业界的广泛关注。本文对国内外多目标项目调度的研究成果进行了系统归纳与梳理, 综述了多目标项目调度问题的数学模型及其求解算法, 总结了多目标项目调度问题的一些扩展问题与应用领域, 最后指出了未来进一步的研究方向。

关键词: 项目调度; 多目标; 模型; 算法; 综述

中图分类号: N945; O223 文献标识码: A

A literature review of multi-objective project scheduling

LIU Yinbin, YU Mimi, LI Hongbo, HU Ziyi

(School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Delivering the project timely with high quality and within project budget is the core objective of project management. It is of natural multi-objective attributes. This also leads to the study of multi-objective project scheduling. Because of the theoretical importance and the practice background, multi-objective project scheduling problems have been attracting many research efforts in the field of project scheduling. This paper provides a literature review of the research on multi-objective project scheduling. The mathematical models and solution algorithms of multi-objective project scheduling problems are reviewed. The extensions and applications of multi-objective project scheduling problems are surveyed. Finally, the future research directions are proposed.

Keywords: project scheduling; multi-objective; models; algorithms; literature review

0 引言

在当今经济发展与技术进步日新月异的时代, 企业面临的竞争环境越来越富有挑战性。为了应对这一形势, 越来越多的企业采用项目对其生产经营活动进行管理^[1]。虽然项目管理日益盛行, 但在世界范围内, 一个不容忽视的事实是, 项目的成功率仍然很低, 大量项目难以在预算内按时完工^[2, 3]。许多项目失败的根源可以追溯到缺乏有效的计划与调度^[4]。

项目调度的目标是为项目中的每个活动确定开始时间, 从而形成“基线进度计划”(Baseline Schedule, 即项目时间表), 该计划在满足活动优先关系约束、资源约束及其他项目需求的基础上, 优化项目的某些绩效指标(如最小化工期、均衡资源利用等)。基线进度计划也是组织与外部机构沟通的依据, 如物资采购、向客户承诺交付日期等, 从而维持供应链的效率。

在项目管理实践中, 在项目预算内高质量地及时交付, 是项目的核心目标。这也导致相应的项目调度问题具有典型的多目标特性。在理论上, 单个目标的项目调度问题多为 NP 难问题^[5], 而多个目标的引入, 进一步加剧了项目调度的复杂性。此外, 在项目计划与调度

基金项目: 国家自然科学基金项目(71602106; 71702097; 71572104); 教育部人文社会科学研究项目青年基金项目(15YJCZH077; 17YJC630238; 17YJC630177)。

作者简介: 李洪波(1985-), 男, 山东东营人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 通讯作者, 研究方向: 项目调度, 人工智能. E-mail: ishongboli@gmail.com.

过程中同时考虑工期、成本、质量、资源、鲁棒性等多个目标，可以显著提升项目管理的决策水平与项目的成功率，但同时也对调度算法提出了更高的要求。

作为一类重要的系统优化问题，多目标项目调度问题（Multi-Objective Project Scheduling Problem, MOPSP）以其重要的理论价值和密切的实践相关性，受到了学界和业界的广泛关注，产生了一系列重要的研究成果。本文旨在对 MOPSP 的模型、算法、扩展与应用进行系统梳理与总结。为了反映 MOPSP 的发展脉络，本文既涵盖一些早期的经典文献，也包含近十余年来发表在国内外高水平期刊上的文献。

1 模型

1.1 问题描述

基本的 MOPSP 描述如下：

(1) 项目网络。项目用节点式（Activity-On-Arrow, AOA）网络 $G = (V, E)$ 表示，其中 V 为节点的集合，表示项目中的活动， $V = \{1, \dots, n\}$ ； E 为有向弧的集合，表示活动之间的优先关系， $E \subseteq V \times V$ 。当 $(i, j) \in E$ 时，称活动 i 是 j 的紧前活动， j 是 i 的紧后活动，即活动 i 完成之后，活动 j 才可以开始。活动 1 和 n 为虚活动，分别代表项目的开始和结束。

(2) 时间参数。每项活动 j 的开始时间和工期分别用整数 s_j 和 d_j 表示。虚活动的工期为 0。活动开始后不允许中断（即不可抢占）。活动 j 的完成时间为 $c_j = s_j + d_j$ 。用 \bar{d} 表示项目的截止日期。

(3) 资源参数。项目中存在 K 种可更新资源。活动 j 在执行时、每个单位时间内对第 k 种可更新资源的需求量为 r_{jk} ，第 k 种可更新资源的供应量为 R_k ($k = 1, 2, \dots, K$)。

(4) 调度目标。MOPSP 旨在满足相关约束条件（如活动优先关系、资源约束等）的前提下，制定一个项目基线进度计划 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ （该计划给出了每项活动的计划开始时间），从而优化工期、成本等多种项目绩效（具体的目标函数将在第 1.2 节讨论）。

1.2 目标函数

表 1 总结了现有 MOPSP 研究中涉及的主要目标函数及其代表性文献。根据优化的项目绩效类别的不同，将这些目标函数进一步分为以下 4 类：

(1) 时间类目标函数

- 最小化项目工期：其数学形式见表 1 中的式 (1)，该式最小化虚活动 n 的开始时间，等价于最小化项目工期。
- 最小化拖期：其数学形式见表 1 中的式 (2)，该式最小化所有活动加权拖期之和，其中 ω_j 反映了活动 j 拖期后果的严重程度， D_j 表示活动 j 的计划交付时间。

表 1 MOPSP 研究中涉及的主要目标函数

类别	目标函数的数学形式	编号	正规/ 非正规	代表性文献
时间类	$\min s_n$	(1)	正规	[6][7][8][9][10][11][12][13][14][15][16][17][18][19][20][21][22][23][24][25][26][27]
	$\min \sum_{j=1}^n \omega_j \max\{0, c_j - D_j\}$	(2)	正规	[28]
	$\min \sum_{j=1}^n (ls_j - es_j)$	(3)	正规	[6][7][29]
	$\max \sum_{j=1}^n \alpha_j E s_j - s_j $	(4)	非正规	[30][31][32][33][34][35][36]
资源类	$\min \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{\bar{d}} c_k u_{kt}^2$	(5)	非正规	[9][16][17][37][38][39][40][41]
	$\min \sum_{k=1}^K C_k (R_k)$	(6)	非正规	[35][42][43][44]
财务类	$\min C_T = \begin{cases} C_{di} + C_{in} + (s_n - \bar{d})C_b, s_n < \bar{d} \\ C_{di} + C_{in} + (s_n - \bar{d})C_p, s_n > \bar{d} \end{cases}$	(7)	正规	[8][9][10][11][13][15][27][34][45]
	$\max \sum_{j=1}^n NCF_j \exp(-\beta c_j)$	(8)	非正规	[20][21][24][38][46]
质量类	$\max \sum_{j=1}^n q_j$	(9)	非正规	[47][48][49][50]

- 最小化活动的时差之和：其数学形式见表1中的式（3），该式最小化所有活动的时差之和，即在满足优先关系和资源约束的前提下、活动最晚开始时间与最早开始时间之差的和，其中 ls_j 和 es_j 分别表示活动 j 的最晚和最早开始时间。
- 最大化进度计划的鲁棒性：其数学形式见表1中的式（4），该式最大化活动实际开始时间与计划开始时间绝对偏差的期望加权和，其中 α_j 表示活动 j 的开始时间不稳定导致的单位成本， E 为期望值算子， s_j 是随机变量，表示活动 j 的实际开始时间。

(2) 资源类目标函数

- 资源均衡：其数学形式见表1中的式（5），该式最小化资源使用量平方的加权和，从而令项目资源尽量均衡。其中权重 c_k 表示项目执行时第 k 种资源使用量的波动导致的单位惩罚成本， $u_{kt} = \sum_{i \in A_t} r_{ik}$ 表示在时段 t 、第 k 种资源的总使用量（ A_t 为 t 时段正在执行的活动集合，即 $A_t = \{j | s_j \leq t < s_j + d_j \wedge j \in V\}$ ）^[51, 52]。
- 最小化项目资源获得成本：其数学形式见表1中的式（6），该式最小化所需资源的总支付成本，即资源投资。其中 $C_k(R_k)$ 表示获取第 k 种资源所需的成本。

(3) 财务类目标函数

- 最小化项目成本：其数学形式见表1中的式（7），该式最小化项目的总成本，其中直接成本 $C_{di} = \sum_{j=1}^n C_j$ 表示与活动直接相关的成本；间接成本 $C_{in} = C_d \times s_n$ 表示与活动非直接相关的成本； $(s_n - \bar{d})C_b$ 表示项目提前完工时的奖励， $(s_n - \bar{d})C_p$ 表示由项目拖期产生的惩罚成本。 C_j 表示活动 j 的直接成本， C_d 表示每一时间段的间接成本， C_b 表示项目提前完工时每一时间段的奖励， C_p 表示项目拖期时每一时间段的惩罚。
- 最大化项目净现值：其数学形式见表1中的式（8），该式最大化项目的净现值，其中 NCF_j 表示活动 j 结束时的净现金流， β 为折现率。

(4) 质量类目标函数

- 最大化项目的质量：其数学形式见表1中的式（9），该式令项目以尽可能好的质量标准执行，其中 q_j 表示第 j 项活动完成时的质量水平。

表1还区分了上述目标函数是否为正规的^[53]。对于正规（Regular）目标函数，将一些活动提前开始，可能会有利于改进目标函数值。最常见的正规函数是项目工期，在通常情况下，提前某些活动的开始时间，可能会导致项目总工期缩短。对于非正规（Non-regular）目标函数，活动提前开始不会改善目标函数值，延缓一些活动的开始反而可能会改善目标函数值^[53]。典型的非正规目标函数是项目净现值，在不改变其他条件的情况下，延缓活动的开始时间可能推迟现金的流出，从而可能改善项目净现值。在MOPSP中，如果同时优化的几个目标函数都是正规目标函数，这样的优化可能意义不大，因为其中的任何一个目标函数被优化了，其他目标函数很可能也同时被优化。因此，现有MOPSP研究涉及中的目标函数，通常是同时包含正规和非正规目标函数。

1.3 优化模型

基本的MOPSP优化模型可以统一表述如下：

$$\text{Optimize: } f_1(S), f_2(S), \dots, f_p(S) \quad (10)$$

$$\text{Subject to: } s_1 = 0, \quad (11)$$

$$s_i + d_i \leq s_j, \quad \forall (i, j) \in E \quad (12)$$

$$s_n \leq \bar{d}, \quad (13)$$

$$\sum_{j \in A_t} r_{jk} \leq R_k, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, \bar{d} \quad (14)$$

$$s_j \geq 0, \quad (15)$$

$$s_j \in \mathbb{Z}. \quad (16)$$

其中，进度计划 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 为决策变量，式（10）为目标函数，它同时优化 p 个目标。约束条件（11）令项目在0时刻开始。式（12）为优先关系约束。式（13）为项目截止日期约束，即项目的完成时间 s_n 不能超过项目的截止日期 \bar{d} 。式（14）为资源约束，即每个时段 t 、

所有正在执行的活动对第 k 种资源的需求量之和不能超过第 k 种资源的供应量。约束条件 (15) - (16) 限制活动的开始时间为非负整数。

现有研究中涉及的 MOPSP 优化模型,基本都可以纳入上述优化框架。需要指出的是,给定一个具体的多目标项目调度问题,上述优化模型中的约束条件可能会发生变化。例如,如果目标函数中同时优化时间和资源类目标函数,则式 (13) 和 (14) 可能不会出现在约束条件中,而是以适当的形式反映在目标函数中。

满足约束条件 (11) - (16) 的进度计划 S 称为可行的进度计划。以目标函数最小化为例,给定一个可行的进度计划 S , 如果对于所有的 $u \in \{1, 2, \dots, p\}$, 均不存在另一个可行进度计划 S' , 使得 $f_u(S') \leq f_u(S)$; 并且存在某些 $j \in \{1, 2, \dots, p\}$, 使得 $f_j(S') < f_j(S)$, 则称 S 称为帕累托最优进度计划 (也称帕累托最优解、有效解或者非支配解)^[54]。帕累托最优解的集合称为帕累托最优集。帕累托最优解对应的目标函数值的集合称为帕累托前沿^[55]。MOPSP 的求解目标,就是获得帕累托最优集,即一组具有帕累托最优性的进度计划。

本文综述的 MOPSP 是许多经典的、具有 NP 难特性的项目调度问题的泛化,如资源受限项目调度问题 (Resource-Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP)、资源均衡问题 (Resource Leveling Problem, RLP) 等,因此本文涉及的 MOPSP 问题均为 NP 难的。

2 算法

鉴于 MOPSP 问题的 NP 难特性,求解 MOPSP 时,精确算法一般只适用于小规模实例,对大规模实例通常难以在合理时间内求解完成。因此,非精确算法成为目前 MOPSP 求解算法的研究重点与热点。

非精确算法可进一步区分为启发式算法和元启发算法,虽然它们不能确保获得理论上的最优解,但通常可在合理时间内求得大规模问题的满意解。启发式算法基于决策者的经验、针对特定问题而设计^[56]。元启发算法有时也称智能算法^[57],它给出了求解问题的一般框架,可以灵活地处理具有复杂结构的 MOPSP 问题,从而高效地获得 MOPSP 的帕累托最优解集。启发式算法的求解效果通常比元启发算法要差,但它可以作为一个模块嵌入元启发算法,或者为元启发算法提供初始解。目前 MOPSP 的算法研究中,单纯的启发式算法因优化效果较差而较少涉及,因此本节重点综述精确算法和元启发算法。

2.1 精确算法

现有研究中, MOPSP 的精确算法主要有分支定界法、数学规划等。Sen 等^[28]针对时差和拖期最小化的双目标调度问题,设计了分支定界算法,并基于此问题测试了 360 个随机产生的实例。Nudtasomboon 等^[39]最小化项目工期、项目总成本和资源均衡,并假设活动可以中断,建立了 0-1 整数规划模型。Kobyłański 等^[29]建立了非线性规划模型解决鲁棒性最大化的双目标调度问题。Kobyłański 等^[29]用反例证明了最大化总时差并不总是能提高进度计划的鲁棒性,作者提出用最大化最小时差、最大化最小时差与活动时间之比这两个新目标来衡量进度计划的鲁棒性。Pulat 等^[58]采用枚举和迭代算法解决项目时间-资源权衡问题。总的来看,现有研究结果显示,分支定界法的求解效果优于其他精确算法^[6]。

2.2 元启发算法

元启发算法求解 MOPSP 的基本流程如下:首先,用随机化方法或启发式方法生成初始进度计划,并将其编码为适宜元启发算法操作的解的形式。然后,对编码后的解,利用元启发算法中的各种操作不断进行迭代,从而令新的解不断向帕累托最优解集靠近。为了评价一个解的优劣,需要将其解码为进度计划,计算该计划对应的目标函数值。最后,算法达到指定终止条件时,输出 (近似)帕累托最优进度计划集合。

2.2.1 编码与解码

MOPSP 中常用的编码方式主要有^[59, 60]:

(1) 直接编码^[9, 10, 16, 36, 37, 38, 41, 61, 62, 63, 64]: 直接将进度计划(即活动开始时间向量)作为元启发算法的输入。这种编码方式无需解码过程,但容易产生违反优先关系和资源约束约束的解,需要引入额外的处理方法将进度恢复为可行。

(2) 活动列表编码^[6, 7, 21, 43, 44, 65, 66]: 使用一组向量 $\gamma = (\varphi)$ 表示进度计划,其中 φ 表示活动编号构成的列表。对于这种编码方式,可以采用串行进度生成机制(Serial Schedule Generation Scheme, SSGS)或并行进度生成机制(Parallel Schedule Generation Scheme, PSGS)^[60]进行解码。

(3) 活动优先规则编码^[15, 67, 68, 69]: 事先选定一组优先规则作为优先规则集,再从中选择 n 条规则构成向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$,其中 λ_i 表示活动 i 采用的活动优先规则。一般采用串行或者并行进度生成机制进行解码。

(4) 随机键编码^[27, 70]: 使用一组向量 $(key_1, key_2, \dots, key_n)$ 表示编码后的进度计划,其中随机数 $key_i \in (0,1)$ 表示活动 i 的优先值, key_i 值大的活动被优先调度。采用串行或者并行进度生成机制进行解码。

上述编码方式中,除直接编码外,其他编码方式由于解码过程的引入,可以确保解的可行性。此外,Alba等^[8]和Xiao等^[25]的遗传算法中采用二进制编码:用0和1组成的二值符号集表示活动的开始时间,解码时根据各位置对应的二进制编码确定各活动的开始时间。

2.2.2 主要的元启发算法

表2列出了目前求解MOPSP的主要的多目标元启发算法^[71]。同时,表2还从编码方式、目标函数、是否包含计算实验等方面对文献做了进一步分类。目前MOPSP的文献中,活动列表编码和直接编码方式使用较多,研究得较频繁的目标函数有项目工期最小化、资源均衡和项目成本最小化。

表2 主要的多目标元启发算法

算法	编码方式	文献	目标函数	计算实验
遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)	直接编码	[9]	(1) (5) (7)	有
	直接编码	[10][61]	(1) (7)	有
	直接编码	[16]	(1) (5)	无
	直接编码	[37][67]	(1) (7)	无
	活动列表编码	[21]	(1) (8)	有
非支配排序遗传算法(Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)	活动列表编码	[65]	(1) (5)	有
	随机键编码	[27]	(1) (4) (6)	有
模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA)	直接编码	[36][63]	(1) (4)	有
	活动列表编码	[7]	(1) (4)	无
帕累托模拟退火算法 (Pareto Simulated Annealing, PSA)	活动优先规则	[15][67]	(1) (7)	无
粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)	直接编码	[9]	(1) (5) (7)	有
	直接编码	[62]	(1) (5)	有
	随机键	[27]	(1) (4) (6)	有
	随机键	[70]	(1)	有
禁忌搜索算法 (Tabu Search, TS)	直接编码	[36]	(1) (4)	有
	直接编码	[38]	(5) (8)	有
	活动列表编码	[6]	(1) (4)	有
蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)	活动优先规则	[69]	(1)	有
分布估计算法(Estimation of Distribution Algorithm, EDA)	活动列表编码	[43]	(1) (6)	有
	活动列表编码	[44]	(1) (6)	无
教学算法(Teaching Learning Based Optimization, TLBO)	活动列表编码	[66]	(1) (6)	有

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是目前多目标项目调度领域研究得最多的元启发算法。Afruri等^[10]提出了基于模糊数的GA,并与非支配排序遗传算法(Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)、多目标蔓延杂草入侵算法、非支配排序遗传算法和帕累托进化算法进行了对比实验,实验结果表明模糊遗传算法可以有效解决多模式时间-成本均衡问

题。Kılıç 等^[61]的实验表面了 GA 是解决不同风险水平下时间-成本均衡问题的一种高效方法。Khalili 等^[21]研究了多种群 GA 和两阶段 GA, 并基于 RanGen 生成的数据集分析了这两种算法, 结果表明两阶段 GA 解的质量优于多种群 GA。Zoraghi 等^[27]基于项目调度问题库 PSPLIB 中的 480 个实例, 将 NSGA-II、强帕累托进化算法、粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 和基于分解的进化算法进行了比较, 结果表明 NSGA-II 在解的多样性等方面表现出优势。王宏等^[65]针对多模式农业项目调度问题, 基于任务列表和模式向量的编码方式设计了 NSGA-II。Leu 等^[37]基于 GA 研究了建筑活动的资源浪费和资源短缺问题, 在此基础上, Leu 等^[64]进一步考虑了风险, 运用模糊集理论对不确定因素建模。上述研究中, Leu 等^[37]和 Leu 等^[64]没有给出计算实验分析, 难以从计算角度提供算法有效性的进一步证据。

模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) 也是求解 MOPSP 的常用算法。庞南生等^[63]将鲁棒串行进度生成机制与 SA 结合, 采用分层优化的思想改进了 SA 算法, 即在搜索过程中, 作者优先考虑的是工期最短的目标函数, 其次考虑鲁棒优化的要求, 并且利用 PSPLIB 中的 J30、J60、J90 和 J120 数据集验证了算法的有效性。崔南方^[36]等基于 SA 与禁忌搜索算法 (Tabu Search, TS), 建立了二阶段智能求解方法, 采用分散缓冲法 STC (Starting Time Criticality) 来保证进度计划的鲁棒性, 其仿真结果表明二阶段智能算法的解优于单智能算法。Hapke 等^[67]采用两阶段的方法求解 MOPSP, 采用帕累托模拟退火算法 (Pareto Simulated Annealing, PSA) 产生一组近似非支配解, 再用束搜索算法对产生的近似解和决策者进行交互分析, 从而得到最好的折衷解; 而 Hapke 等^[15]则基于模糊空间产生帕累托近似解。Abbasi 等^[7]用一个包含 50 个活动的实例来验证了其算法, 没有给出计算性能分析。虽然 Abbasi 等^[7]与崔南方^[36]等研究的都是双目标鲁棒性项目调度问题, 但是 Abbasi 等^[7]只考虑了完工鲁棒性 (保证项目完工时间), 崔南方^[36]等则不仅考虑了完工鲁棒性, 还考虑了计划鲁棒性 (保证项目执行的稳定性)。

此外, PSO 在 MOPSP 中也得到了较多应用。Ashuri 等^[9]采用模糊混合 GA-PSO 算法解决多目标施工调度问题, 基于两个案例的测试结果表明混合算法优于 Zahraie 等^[72]的 NSGA-II 和 Yang^[73]的 PSO, 并且 Ashuri 等^[9]的混合算法的求解速度是 NSGA-II 的 3.1 倍, 是 PSO 的 2.6 倍。曲红等^[70]通过改变粒子速度与位置更新公式改进了粒子群算法, 基于 PSPLIB 的实验结果表明了改进后的动态粒子群算法的优越性。

在其他算法方面, Al-Fawzana 等^[6]提出了多目标 TS, 基于 PSPLIB 的 J30 测试集, 验证了多目标 TS 的有效性。Neumann 等^[38]通过 270 个实例 (包括 100、200 和 500 个活动) 验证了禁忌搜索算法在处理大规模项目调度问题上的优越性。在蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 方面, 寿涌毅等^[69]改进了 ACO 算法, 引入新的精英策略, 基于 Patterso 问题库进行实验, 结果表明改进后的多种群 ACO 比基本 ACO 和其他启发式算法具有更大的优势, 而且在解决规模较大的复杂项目问题方面的优势更为明显。在分布估计算法 (Estimation of Distribution Algorithm, EDA) 方面, Wang 等^[43]将帕累托 Archive EDA 与随机搜索算法和 NSGA-II 比较, 基于 PSPLIB 的两个数据集 J30 和 J120 的实验结果表明帕累托 Archive EDA 优于随机搜索算法和 NSGA-II。Wang 等^[44]将帕累托 Archive EDA 与单目标进化算法、Zitzler 等^[74]的强帕累托进化算法相比较, 仿真结果验证了帕累托 Archive EDA 的有效性。另外, TLBO 是解决 MOPSP 比较新的算法。王凌等^[66]基于 PSPLIB 中 J30 测试集, 将 TLBO 与 NSGA-II 和帕累托 Archive EDA 进行对比, 实验的结果表明此算法得到的非支配解集的质量优于其他两种算法。

总之, 目前 MOPSP 的元启发算法研究中, 对现有算法进行扩展、混合, 提出一些更为新颖、高效的算法, 是许多学者不断探索的一个领域, 各种优秀成果也层出不穷。

3 扩展

在第 1 节描述的基本 MOPSP 基础上, 扩展有关假设, 或者加入一些其他需要考虑的因素, 便产生了一些 MOPSP 扩展问题, 其中比较有代表性的是不确定 MOPSP、可抢占 MOPSP

以及多模式 MOPSP。

3.1 不确定 MOPSP

在项目的执行过程中,存在各种不确定因素,如天气影响项目进展、资源无法按时到位、资金短缺等。在这种情况下,求解确定性模型得到的最优进度计划可能变为次优、甚至不可行。因此,越来越多的研究开始关注不确定环境下的 MOPSP^[75]。根据对不确定因素的处理方式不同,现有研究可以分为三类:随机 MOPSP (Stochastic MOPSP, SMOPSP)、模糊 MOPSP (Fuzzy MOPSP, FMOPSP) 和鲁棒 MOPSP (Robust MOPSP, RMOPSP)。

(1) SMOPSP

在 SMOPSP 中,采用随机变量对不确定因素进行建模。Azaron 等^[76]研究了随机活动工期下如何最小化项目成本与工期。

(2) FMOPSP

FMOPSP 采用模糊变量对不确定因素进行建模。Leu 等^[64]针对不同决策风险水平下的时间-成本权衡问题,研究了模糊遗传算法。Liang^[77]针对模糊环境下的项目调度问题,以项目成本和工期最小化为目标,设计了一个两阶段模糊线性规划方法。Hossain 等^[78]基于层次分析法,建立了模糊多目标线性规划模型,解决项目成本、时间和附加成本最小化的多目标调度问题,与 Liang^[77]的模型相比,其优势在于通过交互式和分析层级过程来获取最优解。

(3) RMOPSP

鲁棒项目调度旨在不确定环境下、产生一个能够稳定执行的基线进度计划,同时对执行时受到干扰的进度计划进行有效恢复^[35, 79]。将鲁棒性因素作为一个目标函数引入 MOPSP,便导致了 RMOPSP。Al-Fawzan 等^[6]用活动时差之和表示鲁棒性,针对鲁棒性最大化和工期最小化的双目标调度问题,设计了禁忌搜索算法。但 Kobylański 等^[29]认为最大化总时差并不能总是保证进度计划的鲁棒性,并给出了反例,同时提出了两种改进的鲁棒性指标:最大化所有活动时差的最小值、以及最大化所有活动自由时差与项目工期比值中的最小值。Abbasi 等^[7]以鲁棒性最大化和工期最小化为目标,研究了模拟退火算法。

3.2 可抢占 MOPSP

基本的 MOPSP 模型中假设各活动执行时不能抢占,即活动一旦开始执行、便不能中断。但在实践中,合理利用活动的抢占,可以有效缩短项目工期、提高资源利用率,进而改善项目绩效。

由于可抢占 MOPSP 需要引入更多的决策变量和约束条件,提高了获得帕累托最优解的难度,目前关于可抢占条件下的 MOPSP 的文献相对较少。Slowinski^[80]的可抢占项目调度的研究中,以工期、延迟时间和项目总成本最小化为目标。以项目工期和总成本最小化为目标,Phruksaphanrat^[81]建立了可抢占条件下的模糊规划模型。Tavana 等^[50]针对可抢占条件下的时间-成本-质量权衡问题,设计了多目标 NSGA-II,并提出自适应惩罚函数对三个目标进行权衡,与 ϵ -约束算法的对比实验表明,其算法可以在较短时间内获得更多的帕累托最优解。

3.3 多模式 MOPSP

在基本 MOPSP 模型中,每项活动只能以一种模式执行,即每一活动所需要的工期和资源是固定的。但是在实际中,由于活动的工期和费用会随着所分配的资源数量而改变,使得完成一个活动可能存在多种模式,即分配不同数量的资源,会导致活动具有不同的工期。这就产生了多模式 MOPSP^[10, 37, 39, 46, 47, 48, 60, 64, 81, 82, 83, 84]。

Elloumi 等^[12]针对工期和资源消耗最小化的双目标多模式项目调度问题,提出了一种基于混合秩的进化算法。Afruzi 等^[10]设计了模糊调整区间遗传算法求解多模式时间-成本模型。Ghoddousi 等^[13]将项目总工期、总成本和资源力矩偏差最小化的多目标 RCPSP,延伸为多模式时间-成本-资源权衡的优化模型,采用 NSGA-II 寻找非支配解,通过与 Hartmann^[85]的研究进行对比,证实了模型的有效性。

4 应用

随着 MOPSP 研究的深入, MOPSP 已经广泛应用于软件项目管理、农业、新产品开发等多个领域。

Alba 等^[8]建立了项目总成本和工期最小化的多目标调度模型, 解决软件项目调度中的成本和人力资源的管理问题。Xiao 等^[25]研究了与 Alba 等^[8]类似的问题, 设计了蚁群算法, 并且与遗传算法进行了对比, 实验结果表明了其蚁群算法的有效性。以最小化可更新资源和不可更新资源总量及资源方差为目标, 郭研等^[62]研究了软件项目中的多模式多资源均衡的 MOPSP, 将种群竞争模型嵌入到了向量评价微粒群算法中。

Hapke 等^[15]和 Hapke 等^[67]将 MOPSP 的模型与算法应用于农业项目调度问题, 最小化项目工期、项目总成本以及资源使用量的变异, 并分别设计了模糊 PSA 和 PSA 算法。

Chen 等^[11]将多目标项目调度的方法应用于电气设备公司的节能产品开发中, 建立了非线性整数规划模型, 其模型考虑了员工的学习和遗忘因素, 针对产品开发中的技能效率最大化、项目工期和项目总成本最小化的多目标项目调度问题, 设计了 NSGA-II 算法。

5 结论与展望

多目标项目调度以其重要的理论价值和实践意义, 受到了众多学者的广泛研究, 在模型、算法、扩展与应用等方面, 涌现出一系列高水平研究成果。在多目标项目调度研究领域, 未来的研究值得从以下几个方面进一步推进:

(1) 在建模方面, 研究更为高效的数学规划模型, 或者将资源受限项目调度领域的一些新的建模方式^[86]引入多目标项目调度领域, 将有助于这一领域的深入发展。

(2) 在算法方面, 鉴于多目标项目调度问题的 NP 难特性, 开发高效的元启发算法将始终是这一领域的研究热点, 应注重更为有效的新型智能算法的使用, 同时设计新颖的编码、解码方式和高效便捷的搜索策略等。

(3) 在多目标项目调度的扩展方面, 以下角度值得进一步探索: ① 基于行为运筹学, 在多目标项目调度模型中引入人的心理与行为因素, 有助于进一步提高项目管理者的决策水平。② 目前很少有学者将工作分解与项目绩效集成考虑, 活动的分解粒度显然对项目进度和成本有所影响, 因此有必要研究项目工作分解对多目标调度的影响。③ 项目风险与多目标项目调度的集成研究值得期待^[87]。目前多目标项目调度的研究中, 较少考虑风险相关的因素^[23], 借助金融领域的实物期权方法评估项目风险水平, 有望降低项目的不确定性。

(4) 大数据和人工智能正在对众多领域带来变革性影响, 大数据分析技术与人工智能方法应用于项目管理的潜力正逐步被认可^[87]。传统的项目调度研究主要以最优化方法为工具, 将大数据与人工智能中的预测、机器学习等方法应用于多目标项目调度研究, 进而拓展项目调度理论、开发新的在线实时项目调度方法, 将有助于进一步提高项目管理者的决策水平和项目的成功率。

(5) 多目标项目调度的应用领域有待进一步扩展, 把多目标项目调度的模型与方法应用于更多的实践领域, 将极大丰富项目调度的研究^[88, 89]。

参考文献:

- [1] 侯学良, 王毅. 大型建筑工程项目实施状态诊断指标体系的科学构建(上)——理论篇[J]. 系统科学学报, 2018, 26(02): 76-79+136.
- [2] Pich M T, Loch C H, Meyer A D. On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management[J]. Management Science, 2002, 48(8): 1008-1023.
- [3] Standish Group. CHAOS Report[EB/OL]. <http://www.standishgroup.com>. 2015.
- [4] Herroelen W. Project scheduling—Theory and practice[J]. Production and Operations Management, 2005, 14(4): 413-432.
- [5] Blazewicz J, Lenstra J K, Kan A H G R. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity[J]. Discrete Applied Mathematics, 1983, 5(1): 11-24.
- [6] Al-Fawzan M A, Haouari M. A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 96(2): 175-187.

- [7] Abbasi B, Shadrokh S, Arkat J. Bi-objective resource-constrained project scheduling with robustness and makespan criteria[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 180(1): 146-152.
- [8] Alba E, Chicano J F. Software project management with GAs[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(11): 2380-2401.
- [9] Ashuri B, Tavakolan M. Fuzzy enabled hybrid genetic algorithm–particle swarm optimization approach to solve TCRO problems in construction project planning[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 138(9): 1065-1074.
- [10] Afruzi E N, Roghanian E, Najafi A A, et al. A multi-mode resource-constrained discrete time–cost tradeoff problem solving using an adjusted fuzzy dominance genetic algorithm[J]. *Scientia Iranica*, 2013, 20(3): 931-944.
- [11] Chen R, Liang C, Gu D, et al. A multi-objective model for multi-project scheduling and multi-skilled staff assignment for IT product development considering competency evolution[J]. *International Journal of Production Research*, 2017: 1-29.
- [12] Elloumi S, Fortemps P. A hybrid rank-based evolutionary algorithm applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(1): 31-41.
- [13] Ghoddousi P, Eshtehardian E, Jooybanpour S, et al. Multi-mode resource-constrained discrete time–cost-resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm[J]. *Automation in Construction*, 2013, 30: 216-227.
- [14] Gomes H C, das Neves F A, Souza M J F. Multi-objective metaheuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem with precedence relations[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 44: 92-104.
- [15] Hapke M, Jaszkiwicz A, Słowiński R. Pareto simulated annealing for fuzzy multi-objective combinatorial optimization[J]. *Journal of Heuristics*, 2000, 6(3): 329-345.
- [16] Heon Jun D, El-Rayes K. Multiobjective optimization of resource leveling and allocation during construction scheduling[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(12): 1080-1088.
- [17] Hegazy T. Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1999, 125(3): 167-175.
- [18] Jaskowski P, Sobotka A. Multicriteria construction project scheduling method using evolutionary algorithm[J]. *Operational Research*, 2006, 6(3): 283-297.
- [19] Ji X, Yao K. Uncertain project scheduling problem with resource constraints[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, 28(3): 575-580.
- [20] Kolisch R, Padman R. An integrated survey of deterministic project scheduling[J]. *Omega*, 2001, 29(3): 249-272.
- [21] Khalili S, Najafi A A, Niaki S T A. Bi-objective resource constrained project scheduling problem with makespan and net present value criteria: two meta-heuristic algorithms[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(1-4): 617-626.
- [22] Myszkowski P B, Skowroński M E, Olech Ł P, et al. Hybrid ant colony optimization in solving multi-skill resource-constrained project scheduling problem[J]. *Soft Computing*, 2015, 19(12): 3599-3619.
- [23] Maghsoudlou H, Afshar-Nadjafi B, Niaki S T A. Multi-skilled project scheduling with level-dependent rework risk; three multi-objective mechanisms based on cuckoo search[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 54: 46-61.
- [24] Słowiński R, Soniewicki B, Węglarz J. DSS for multiobjective project scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 1994, 79(2): 220-229.
- [25] Xiao J, Ao X T, Tang Y. Solving software project scheduling problems with ant colony optimization[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(1): 33-46.
- [26] Xiao J, Wu Z, Hong X X, et al. Integration of electromagnetism with multi-objective evolutionary algorithms for RCPSP[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(1): 22-35.
- [27] 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.
- [28] Sen T, Gupta S K. A branch-and-bound procedure to solve a bicriterion scheduling problem[J]. *AIIE Transactions*, 1983, 15(1): 84-88.
- [29] Kobyłański P, Kuchta D. A note on the paper by MA Al-Fawzan and M. Haouari about a bi-objective problem for robust resource-constrained project scheduling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 107(2): 496-501.
- [30] Chtourou H, Haouari M. A two-stage-priority-rule-based algorithm for robust resource-constrained project scheduling[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 55(1): 183-194.
- [31] Hazır Ö, Haouari M, Erel E. Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(2): 633-643.

- [32] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. The use of buffers in project management: The trade-off between stability and makespan[J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 97(2): 227-240.
- [33] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen* W, et al. The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling[J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44(2): 215-236.
- [34] Wang W, Wang X, Ge X, et al. Multi-objective optimization model for multi-project scheduling on critical chain[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 68: 33-39.
- [35] Li H, Demeulemeester E. A genetic algorithm for the robust resource leveling problem[J]. *Journal of Scheduling*, 2016, 19(1): 43-60.
- [36] 崔南方, 赵雁, 田文迪. 基于智能算法的双目标鲁棒性项目调度[J]. *系统管理学报*, 2015, 24(3): 379-388.
- [37] Leu S S, Yang C H. GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1999, 125(6): 420-427.
- [38] Neumann K, Zimmermann J. Procedures for resource leveling and net present value problems in project scheduling with general temporal and resource constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 127(2): 425-443.
- [39] Nudtasomboon N, Randhawa S U. Resource-constrained project scheduling with renewable and non-renewable resources and time-resource tradeoffs[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1997, 32(1): 227-242.
- [40] Rabbani M, Bajestani M A, Khoshkhou G B. A multi-objective particle swarm optimization for project selection problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(1): 315-321.
- [41] Roca J, Pugnaghi E, Libert G. Solving an extended resource leveling problem with multiobjective evolutionary algorithms[J]. *International Journal of Computational Intelligence*, 2008, 4(4): 289-300.
- [42] Demeulemeester E. Minimizing resource availability costs in time-limited project networks[J]. *Management Science*, 1995, 41(10): 1590-1598.
- [43] Wang L, Fang C, Mu C D, et al. A Pareto-archived estimation-of-distribution algorithm for multiobjective resource-constrained project scheduling problem[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2013, 60(3): 617-626.
- [44] Wang L, Fang C, Suganthan P N, et al. Solving system-level synthesis problem by a multi-objective estimation of distribution algorithm[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(5): 2496-2513.
- [45] Hapke M, Jaszkiwicz A, Slowinski R. Fuzzy project scheduling system for software development[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 67(1): 101-117.
- [46] Vanhoucke M, Debels D. The discrete time/cost trade-off problem: extensions and heuristic procedures[J]. *Journal of Scheduling*, 2007, 10(4): 311-326.
- [47] Babu A J G, Suresh N. Project management with time, cost, and quality considerations[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 88(2): 320-327.
- [48] Pollack-Johnson B, Liberatore M J. Incorporating quality considerations into project time/cost tradeoff analysis and decision making[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2006, 53(4): 534-542.
- [49] Salmasnia A, Mokhtari H, Abadi I N K. A robust scheduling of projects with time, cost, and quality considerations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 60(5-8): 631-642.
- [50] Tavana M, Abtahi A R, Khalili-Damghani K. A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time-cost-quality trade-off project scheduling problems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(4): 1830-1846.
- [51] 李洪波, 熊励, 刘寅斌. 项目资源均衡研究综述[J]. *控制与决策*, 2015, (5): 769-779.
- [52] Li H, Xiong L, Liu Y, et al. An effective genetic algorithm for the resource levelling problem with generalised precedence relations[J]. *International Journal of Production Research*, 2017: 1-22.
- [53] Sprecher A, Kolisch R, Drexel A. Semi-active, active, and non-delay schedules for the resource-constrained project scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 80(1): 94-102.
- [54] Ballestín F, Blanco R. Theoretical and practical fundamentals for multi-objective optimisation in resource-constrained project scheduling problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1): 51-62.
- [55] Coello Coello, C.A., D.A. Van Veldhuizen, and G.B. Lamont. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. 2002, New York: Kluwer Academic.
- [56] Viana A, de Sousa J P. Using metaheuristics in multiobjective resource constrained project scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 120(2): 359-374.
- [57] 张于贤, 薛殿春, 丁修坤, 程书瑞. 应用改进萤火虫算法求解基于学习退化效应的PFSP问题[J]. *系统科学学报*, 2017, 25(04): 89-93.
- [58] Pulat P S, Horn S J. Time-resource tradeoff problem [project scheduling][J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1996, 43(4): 411-417.
- [59] Demeulemeester E L, Herroelen W S. *Project scheduling: a research handbook*[M]. Springer Science & Business Media, 2006.

- [60] 寿涌毅. 资源受限多项目调度的模型与方法[M]. 浙江大学出版社, 2010.
- [61] Kılıç M, Ulusoy G, Şerifoğlu F S. A bi-objective genetic algorithm approach to risk mitigation in project scheduling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 112(1): 202-216.
- [62] 郭研, 李南, 李兴森. 多模式多资源均衡及基于动态种群的多目标微粒群算法[J]. *控制与决策*, 2013, (1): 131-136.
- [63] 庞南生, 孟俊姣. 多目标资源受限项目鲁棒调度研究[J]. *运筹与管理*, 2012, (03): 27-32.
- [64] Leu S S, Chen A T, Yang C H. A GA-based fuzzy optimal model for construction time-cost trade-off[J]. *International Journal of Project Management*, 2001, 19(1): 47-58.
- [65] 王宏, 林丹, 李敏强. 一种求解多目标资源受限项目调度的遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, (7): 1-4+12.
- [66] 王凌, 郑环宇. 一种多目标资源受限项目调度问题的教学算法[J]. *控制与决策*, 2015, (10): 1868-1872.
- [67] Hapke M, Jazskiewicz A, Słowiński R. Interactive analysis of multiple-criteria project scheduling problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 107(2): 315-324.
- [68] 刘士新, 宋健海. 模糊多目标资源受限项目调度问题的优化方法[J]. *系统工程学报*, 2008, (6): 744-750.
- [69] 寿涌毅, 傅奥. 多目标资源受限项目调度的多种群蚁群算法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, (1): 51-55.
- [70] 曲红, 吴娟. 基于动态多目标粒子群优化算法的资源受限研发项目进度[J]. *系统工程*, 2007, (9): 98-102.
- [71] Ehrgott M, Gandibleux X. A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization[J]. *OR-Spektrum*, 2000, 22(4): 425-460.
- [72] Zahraie B, Tavakolan M. Stochastic time-cost-resource utilization optimization using nondominated sorting genetic algorithm and discrete fuzzy sets[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 135(11): 1162-1171.
- [73] Yang I T. Using elitist particle swarm optimization to facilitate bicriterion time-cost trade-off analysis[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2007, 133(7): 498-505.
- [74] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257-271.
- [75] 王凌, 郑环宇, 郑晓龙. 不确定资源受限项目调度研究综述[J]. *控制与决策*, 2014, (4): 577-584.
- [76] Azaron A, Tavakkoli-Moghaddam R. Multi-objective time-cost trade-off in dynamic PERT networks using an interactive approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(3): 1186-1200.
- [77] Liang T F. Fuzzy multi-objective project management decisions using two-phase fuzzy goal programming approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 57(4): 1407-1416.
- [78] Hossain M, Mahmud S. Fuzzy Multi-Objective Linear Programming for Project Management Decision under Uncertain Environment with AHP Based Weighted Average Method[J]. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 2016, 9(20): 53-60.
- [79] 李洪波, 徐哲. 鲁棒项目调度研究综述. *系统工程*, 2014, 32(2): 123-131.
- [80] Słowiński R. Multiobjective network scheduling with efficient use of renewable and nonrenewable resources[J]. *European Journal of Operational Research*, 1981, 7(3): 265-273.
- [81] Phruksaphanrat B. Multi-Objective Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem by Preemptive Fuzzy Goal Programming[J]. *Constraints*, 2014, 1: 1.
- [82] Brucker P, Drexel A, Möhring R, et al. Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods[J]. *European journal of Operational Research*, 1999, 112(1): 3-41.
- [83] Senouci A, Al-Derham H R. Genetic algorithm-based multi-objective model for scheduling of linear construction projects[J]. *Advances in Engineering Software*, 2008, 39(12): 1023-1028.
- [84] Wuliang P, Chengen W. A multi-mode resource-constrained discrete time-cost tradeoff problem and its genetic algorithm based solution[J]. *International Journal of Project Management*, 2009, 27(6): 600-609.
- [85] Hartmann S. Project scheduling with multiple modes: a genetic algorithm[J]. *Annals of Operations Research*, 2001, 102(1): 111-135.
- [86] Artigues C, Brucker P, Knust S, et al. A note on “event-based MILP models for resource-constrained project scheduling problems”[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(4): 1060-1063.
- [87] Hall N G. Research and Teaching Opportunities in Project Management[M]//*Optimization Challenges in Complex, Networked and Risky Systems*. INFORMS, 2016: 329-388.
- [88] 李洪波, 徐哲, 于静. 基于 DSM 的研发项目流程多目标仿真优化. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(1): 142-149.
- [89] Wei W, Li H, Leus R. Test sequencing for sequential system diagnosis with precedence constraints and imperfect tests[J]. *Decision Support Systems*, 2017, 103: 104-116.