

鲁棒项目调度研究综述

李洪波, 徐哲

(北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100191)

摘要: 基于确定环境与完全信息的项目调度, 产生的最优进度计划在执行时, 面临实际项目环境中的不确定因素, 可能会与预期产生较大的偏差, 甚至变得不可行, 导致项目进度拖延、预算超支。针对这种问题, 鲁棒项目调度 (robust project scheduling) 可以产生稳定的基线进度计划, 并对执行时受到干扰的进度计划进行有效恢复。概述了鲁棒项目调度产生的背景, 归纳了鲁棒项目调度问题及其研究框架, 评述了项目进度计划鲁棒性的分类, 综述分析了主动型项目调度 (proactive project scheduling) 与响应型项目调度 (reactive project scheduling) 的模型与方法及其在近几年的最新进展。最后指出了鲁棒项目调度进一步的研究方向。

关键词: 鲁棒项目调度; 主动型项目调度; 响应型项目调度

中图分类号: N945

Robust project scheduling: A review

LI Hong-bo, XU Zhe

(School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Because of considerable uncertainty, during execution, the optimal schedule obtained in project scheduling based on deterministic environment and complete information may deviate from the plan, or even become infeasible. Some undesirable consequences, such as schedule delay and/or budget overrun, may occur. Robust project scheduling aims at constructing a stable baseline schedule during the project plan phase and repairing the disturbed schedule during the project execution phase. In this paper, we introduce the background of robust project scheduling; present the robust project scheduling problem and its research framework; discuss the project schedule robustness types; and review the models, methods and latest developments for proactive/reactive project scheduling. Finally, we propose the future research direction.

Keywords: robust project scheduling; proactive project scheduling; reactive project scheduling

1 引言

项目调度问题 (project scheduling problem) 研究在满足活动优先关系和项目资源约束条件下, 按时间对有限的资源进行最优分配, 以优化项目的一个或多个性能指标 (如工期、费用和质量等) [1]。项目调度的结果是获得一个“基线进度计划 (baseline schedule)”, 该计划列出了每项活动的计划开始时间, 可以表示为由活动开始时间 s_n 组成的向量 $S^B = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, n 为项目中活动的数量。基线进度计划有以下重要作用: ① 是向活动分配

资源, 均衡资源利用、优化项目绩效的依据; ② 是与外部组织沟通的依据, 如物资采购, 向客户承诺交付日期等, 以维持供应链的效率。可靠的基线进度计划可以确保项目合理使用资源并及时完工。

传统的项目调度研究多是在确定性环境下进行的, 即假设活动的工期和资源等参数都是确定的。然而, 实际的项目环境充满了不确定性、干扰和风险, 基于确定环境和完全信息确定的最优进度计划在执行时, 可能会与预期产生较大的偏差, 甚至变得不可行, 导致项目进度拖延、预算超支等问

收稿日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助课题 (编号: 71271019, 70871004)。

作者简介: 李洪波 (1985-), 男, 山东东营人, 博士研究生, 研究方向: 项目调度, 管理系统仿真与优化, E-mail: ishongboli@gmail.com; 徐哲 (1964-), 女, 江苏无锡人, 教授, 博导, 博士, 研究方向: 系统工程, 系统仿真与项目管理, E-mail: xuzhebuaa@163.com。

题。为了确保项目顺利、平稳地执行, 必须事先考虑好各种不确定性因素和评估相关风险, 并且在不确定事件发生后给予及时响应。鲁棒项目调度 (robust project scheduling)^[2] 作为解决不确定环境下项目调度问题的有效方法, 其目标是产生一个具有较高的稳定性、并具有一定吸收不确定因素能力的基线进度计划: 以该计划指导项目执行, 力求保证项目中的各活动按时开始, 以及项目按期完工; 进度计划受到干扰后可以对其及时修复, 并确保干扰因素产生的不良后果尽可能小。

鲁棒项目调度可以从很大程度上解决困扰诸多项目的一个基本问题: 无法按时、按预算、按预定规格交付项目。对于实际的项目管理而言, 鲁棒项目调度的优势是显而易见的。鲁棒项目调度减少了重计划、重调度的频率及其产生的成本, 并且一个稳定的进度计划可以令项目经理能够从容、准确地与客户、承包商进行沟通与协调, 保证项目及时交付。

鲁棒项目调度研究在近十余年才逐渐兴起, 虽然之前也零星可见鲁棒项目调度的研究成果出现, 但是, 2004 年和 2005 年, 比利时鲁汶大学教授 W. Herroelen 和 R. Leus 合作发表了两篇不确定环境下项目调度与鲁棒项目调度的综述文章^[3, 4], 这可以看作鲁棒项目调度研究的一个分水岭。自此以后, 大量的鲁棒项目调度研究成果不断涌现。2009 年, 鲁汶大学教授 E. Demeulemeester 和 W. Herroelen 出版了合著《Robust Project Scheduling》^[2], 系统总结了当时鲁棒项目调度的研究成果, 并对一些新的鲁棒项目调度方法做了深入分析, 标志着鲁棒项目调度的研究进一步成熟。

鲁棒项目调度作为一个迅速发展的新领域, 在上述几篇综述性文献出现之后, 新的研究成果不断涌现, 有必要对这些成果进一步归纳整理, 以进一步把握本领域的发展脉络并为后续研究提供支持。因此, 本文在阐述鲁棒项目调度问题及其研究框架

的基础上, 归纳总结进度计划鲁棒性的种类, 重点分析主动型与响应型项目调度的模型和算法在近年来的研究进展, 最后指出鲁棒项目调度未来的研究方向。

2 鲁棒项目调度问题及研究分类

2.1 鲁棒项目调度问题

鲁棒项目调度问题衍生自资源受限项目调度问题 (resource-constrained project scheduling problem, RCPSP), RCPSP 是 job shop 调度问题的泛化, 并且在最优化问题中属于强 NP-hard^[5]。考虑了不确定因素的鲁棒项目调度求解更为困难, 也属于 NP-hard^[6]。

基本的鲁棒项目调度问题可以描述如下:

(1) 一个项目由节点式 (activity-on-node, AoN) 网络 $G = (N, A)$ 表示, 其中 N 为节点的集合, 表示活动, $N = \{1, 2, \dots, n\}$; A 为有向弧的集合, 表示“完成-开始 (FS)”型、零时滞的优先关系。将各活动从 1 到 n 拓扑编号, 其中活动 1 和 n 是虚活动, 分别代表项目的开始和结束。

(2) 每项活动的工期为 d_i ($1 \leq i \leq n$)。项目执行时需要 K 种可恢复的资源, $K = \{1, \dots, k\}$ 。活动 i 在执行时, 每个时间段对资源 k 的需求量为 r_{ik} 。资源 k 在任一单位时间段的最大可获得量为 a_k 。虚活动 1 和 n 的工期均为 0 且不需要任何资源。

(3) 在不确定项目环境下, 上述的某个或某些参数可能成为不确定的量, 分别表示为 \tilde{A} , \tilde{d}_i , \tilde{r}_{ik} , \tilde{a}_k 。

(4) 求解鲁棒项目调度问题, 就是在满足优先关系和资源约束的条件下, 面对项目环境中的不确定性 $\omega(\tilde{A}, \tilde{d}_i, \tilde{r}_{ik}, \tilde{a}_k)$, 为每个活动确定开始时间, 生成基线进度计划 $S^B = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, 最大化 S^B 的鲁棒性 $R(S^B, \omega)$ 。

鲁棒项目调度问题的概念模型可以描述为

$$\text{maximize} \quad R(S^B, \omega) \quad (1)$$

subject to

$$s_i + \tilde{d}_i \leq s_j \quad \forall (i, j) \in \tilde{A} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in S_t} \tilde{r}_{ik} \leq \tilde{a}_k \quad \forall t, \forall k \quad (3)$$

$$s_i \geq 0 \quad \forall i \quad (4)$$

式中, S_t 表示时段 t 正在执行的活动集合, 有 $S_t = \{i | s_i < t \leq s_i + \tilde{d}_i\}$; 目标函数(1)最大化 S^B 的鲁棒性; 式(2)为优先关系约束; 式(3)为资源约束; 式(4)定义了决策变量。鉴于此概念模型包含许多不确定参数, 无法直接求解。在对具体问题建模时, 应根据需要采用不确定优化方法建立具有明确意义的模型。

对于鲁棒项目调度问题的解决思路, Demeulemeester & Herroelen (2009)^[2]所提出的三阶段方法已被众多文献广为采纳。第一阶段: 求解 RCPSP, 生成一个优先关系和资源可行的基线进度计划; 第二阶段: 利用主动型项目调度 (proactive project scheduling), 对基线进度计划进行保护, 使其免受项目执行中可能发生的各类不确定性干扰; 第三阶段: 利用响应型项目调度 (reactive project scheduling), 对项目实际执行时仍受到破坏的进度计划进行修复。

2.2 鲁棒项目调度的研究框架

根据调度时机的不同, 鲁棒项目调度可以分为主动型调度和响应型调度^[2, 3]。主动型调度是在项目执行之前生成一个鲁棒的基线进度计划, 使其尽可能地对各类干扰因素不再敏感。针对项目执行时仍会受到干扰、导致进度计划被破坏的情况, 采用响应型调度对其进行修复。

项目中的不确定因素可分为如下几类: ① 时间的不确定性。活动的实际执行时间或长于、或短于计划时间; 项目的交付日期可能会更改。② 资源的不确定性。项目执行时, 资源的可用量不确定, 可能会出现资源短缺; 物资供应可能无法按时到

达。③ 项目范围的不确定性。有的活动结束后可能会因为没有达到预定的里程碑而导致返工; 因项目范围的变更, 新的活动需要加入、原有的活动没有必要执行。

针对不同类别的鲁棒项目调度, 已有众多有效的方法被提出。以项目调度的时机与不确定因素作为分类标准, 本文将鲁棒项目调度的研究框架归纳为表 1。其中, 基于随机规划的方法已成为目前主流的处理手段, 基于模糊理论、鲁棒优化的方法也逐渐受到重视。对于不确定因素的考虑, 也逐渐从时间不确定性扩展到资源、范围等多种不确定性。众多行之有效的精确或启发式算法也不断出现。

表 1 不确定环境下鲁棒项目调度的研究框架

调度的时机	不确定因素			
	时间不确定	资源不确定	范围不确定	不显式考虑不确定
主动型调度方法	鲁棒资源分配 时间缓冲 随机规划 模糊规划 鲁棒优化	资源缓冲 随机规划 模糊规划 鲁棒优化	设计结构矩阵 图示评审技术	基于确定型模型 (以时差的函数为目标函数)
响应型调度方法	启发式方法、干扰管理、约束规划			基于确定型模型

随机项目调度 (stochastic project scheduling)^[4]

是处理时间不确定条件下项目调度的常用方法, 它与鲁棒项目调度有明显区别, 主要表现为: ① 随机项目调度针对的不确定因素是时间不确定, 它把调度问题看作一个多阶段决策过程。鲁棒项目调度研究的不确定因素并不局限于时间不确定。② 随机项目调度通常以优化期望工期为目标。鲁棒项目调度以进度计划的鲁棒性为优化目标。③ 随机项目调度在项目执行前不生成基线进度计划, 而是随着项目的推进, 在每个决策阶段, 采用“调度策略” (scheduling policies) 在满足优先关系与资源约束的条件下, 确定可执行的活动集合, 动态产生进度计划。正是这个原因, 随机项目调度也经常被称为“完全响应型调度” (purely reactive) 或“在线调度” (online procedures)。鲁棒项目调度通常需要在项目执行前生成一个鲁棒的基线进度计划。

3 进度计划鲁棒性的分类

鲁棒性 (robustness) 一般是指当系统存在不确定因素时, 系统仍然能够保持正常工作的特性, 即系统具有一定承受不确定性影响的能力^[7]。进度计划的鲁棒性, 即进度计划在执行时, 具有一定承受不确定与干扰因素影响的能力^[8]。研究进度计划鲁棒性有两个角度: 解的取值和目标函数的取值。相应地, 已有研究中所涉及的项目鲁棒性的评价指标也分为: 解的鲁棒和质量鲁棒, 以及上述两者的复合^[2]。

3.1 解的鲁棒

解的鲁棒 (solution robustness), 也称为进度计划的稳定性 (schedule stability), 衡量的是基线进度计划 S^B 与实际执行时的进度 S^R 的差异。Leus & Herroelen (2004)^[9] 建议用计划与实际的开始时间的绝对差异的加权和来衡量解的鲁棒。有

$$\Delta(S^B, S^R) = \sum_{i \in N} w_i |S_i - s_i| \quad (5)$$

式中, s_i 表示活动 i 在基线进度计划 S^B 中的计划开始时间; N 为活动编号集合, $i \in N$; S_i 为随机变量, 表示活动 i 在实际进度 S^R 中的实际开始时间; 权重 w_i 代表活动 i 在单位时间的惩罚成本, 即活动 i 的实际开始时间早于或晚于计划开始时间一单位所产生的成本, $w_i \geq 0$ 。该成本权重数值大小反映了更改在预定的时间窗内获取资源的难易程度, 或者准时执行活动的重要性。在实际项目中, 这一惩罚成本可能是相当大的数值。

基于 (5) 式, 在主动型调度中最大化鲁棒性, 就等价于最小化活动的计划时间与实际开始时间差异的期望的加权和, 即

$$\text{minimize } \sum_{i \in N} w_i E|S_i - s_i| \quad (6)$$

式中, E 为期望值算子。上式通常也被称为稳定性成本目标函数。Leus & Herroelen (2005)^[6] 已经证明, 以上式为目标函数的问题是 NP-hard, 因此, 在大规模问题中用解析法求解上式中的期望值是

不现实的, 仿真方法是常用的方法^[9]。

也有研究用更容易计算的代理目标函数衡量解的鲁棒, 如基于时差的解的鲁棒指标^[10-12]。

3.2 质量鲁棒

质量鲁棒 (quality robustness) 指的是基线进度计划对应的目标函数值对于干扰因素不敏感。质量鲁棒的思想是构造一个基线进度计划, 当干扰出现时, 该计划对应的目标函数值不会恶化。

质量鲁棒可以用目标函数的期望值来衡量, 如期望工期 $E[C_{\max}]$ 。质量鲁棒还可以用所谓的“服务水平” (即, 项目及时完工概率) 来衡量, 即 maximize $P(S_n \leq \delta_n)$ 。其中, S_n 为代表项目完成的虚节点 n 的实际完成时间; δ_n 为项目的截止日期。即使在不考虑资源约束的条件下, 对该目标函数进行解析求解仍是非常困难的, 这一问题为 NP-hard^[2]。

3.3 复合鲁棒性指标

如果同时考虑解的鲁棒与质量鲁棒, 可以引入复合鲁棒性指标。Van de Vonder et al. (2008)^[13] 采用双目标形式定义复合鲁棒性指标, 有

$$F \left[P(S_n \leq \delta_n), \sum_i w_i E|S_i - s_i| \right] \quad (7)$$

上述目标函数同时包含解的鲁棒与质量鲁棒。如果无法先验获知这一复合目标函数 $F[\cdot, \cdot]$ 的具体形式, 并且两个评价准则的相对重要性也无法获知, 则无法用两个准则的线性组合来反映决策者的偏好。因此, 解析方法难以对这一复合目标函数进行有效处理, 仿真方法也就成为一种替代选择。

4 主动型调度模型与方法

主动型调度 (proactive scheduling, 国内也译作预应式调度、前摄调度等) 发生在项目计划阶段, 它通过分析各类不确定性因素对项目进度计划的影响, 考虑各种可能出现的干扰, 建立对干扰不灵敏的进度计划, 即鲁棒的进度计划。

主动型调度是鲁棒项目调度研究中相对成熟的一个领域。根据对不确定因素的处理方法不同, 主动型调度分为: ① 基于确定型模型的主动型调度, 即不对未来情况进行任何估计, 参数均取最可能值; ② 基于随机或模糊模型的主动型调度, 即估计未来情况的概率(或可能性)与后果; ③ 基于鲁棒优化模型的主动型调度, 即只估计可能的场景, 不需要分布信息。

随机规划与鲁棒优化作为两大典型的不确定性优化技术, 是处理不确定条件下鲁棒项目调度的主流方法。随机规划基于概率模型用概率分布描述数据的不确定性, 通常是以优化系统的期望性能作为目标。鲁棒优化以获得对参数不确定性不敏感的解为目标, 通常优化系统在最坏情况下的性能(worst-case performance), 从而保证产生的解在最坏情况发生时仍能良好执行。因为鲁棒优化是面向最坏情况的, 导致该方法相对比较保守。如果可以获得有关参数的确切概率分布信息, 随机规划模型应当作为首选方法。当然, 随机规划模型也受困于“维灾难”, 计算量按指数增加。如果无法获得确切的概率分布信息, 则鲁棒优化更为适用。

4.1 基于确定型模型的主动型调度

基于确定型模型的主动型调度假设完全信息与确定参数, 用确定型的优化模型对问题建模。这类调度模型与常见的 RCPSP 的区别主要在于目标函数, 这类模型主要以项目时差的函数作为鲁棒性的衡量指标, 通过最大化各类时差及其函数, 获取鲁棒的进度计划。其他方面与 RCPSP 基本类似, 如模型中的时间、资源等参数都采用确定值, 通常是按照最可能值估计出来的, 不对项目未来所面临的干扰情况进行估计。

Al-Fawzan & Haouari (2005)^[10]将考虑资源约束的活动的自由时差(FS)定义为: 不影响其紧后活动最早开始和不违背资源约束的条件下, 该活动的最早开始时间可以浮动的时间。并将所有活动自

由时差之和作为进度计划的鲁棒性指标。由此建立了双目标资源受限项目调度模型, 以最大化鲁棒和最小化工期作为目标函数, 使用禁忌搜索算法对问题求解, 获得有效的进度计划。从本质上看, Al-Fawzan & Haouari 的研究是建立在确定性环境中的, 没有对未来项目执行时可能发生的情况进行估计, 只是在 RCPSP 的解空间进行搜索, 找到其中鲁棒性最高的进度计划。Abbasi et al. (2006)^[14]对 Al-Fawzan & Haouari 提出的双目标调度模型采用禁忌搜索算法进行求解。Kobylanski & Kuchta (2007)^[12]对 Al-Fawzan & Haouari 所采用的鲁棒性指标提出了质疑, 指出该指标不能全面描述进度计划的鲁棒性, 并通过反例说明了 Al-Fawzan & Haouari 的指标对于某些项目调度问题的实例不能产生鲁棒的进度计划。基于此, 他们在综合考虑解的鲁棒和质量鲁棒的基础上, 提出了两种改进的鲁棒性指标: ① 所有活动自由时差中的最小值; ② 所有活动自由时差与项目工期比值中的最小值。最大化鲁棒性即最大化上述指标。

Chtourou & Haouari (2008)^[11]提出了 12 种鲁棒性指标, 这些指标都是以活动的自由时差为基础进行计算的。为了获取鲁棒的项目进度计划, 作者采用基于优先规则的启发式方法中的偏倚随机抽样多路算法(biased-sampling-multi-pass method)进行求解, 求解过程分为两个阶段: 第一阶段采用偏倚随机抽样多路算法求解标准的 RCPSP 问题, 将获得的最优工期加入第二阶段的约束条件; 第二阶段以最大化鲁棒性为目标函数, 仍采用偏倚随机抽样多路算法求解, 最终获取到具有最小工期和最大鲁棒的进度计划。

基于确定型模型的主动型调度的最大优点在于, 其生成的鲁棒基线进度计划所对应的项目工期, 通常可以保证等于或非常接近于最短工期。然而, 也正因为这点, 加之不对未来项目执行期间的可能情况进行预测, 使得这类方法产生的进度计划

的鲁棒性表现较差, 仅适用于不确定程度较低的项目环境。

4.2 基于随机或模糊模型的主动型调度

基于随机或模糊模型的主动型调度, 克服了确定型模型的缺点, 利用随机变量或模糊变量对不确定的参数(如活动的工期、资源等)建模, 从而产生鲁棒性表现较好的进度计划。随着基于随机或模糊模型的主动型调度研究的深入, 这一方向的研究经历了无资源约束、有资源约束的阶段, 问题的难度不断增加, 现实相关性也逐步提高。

4.2.1 时间不确定条件下的调度

作为最早的研究者之一, Herroelen & Leus (2004)^[15]假设不存在资源约束, 在工期不确定条件下构建鲁棒的进度计划。他们以具有一定概率的干扰场景来表示工期面临的不确定性, 以(6)式为目标函数, 建立数学规划模型。他们的模型与网络流模型具有一定相似性, 因此设计了基于网络流算法的精确解法。

针对时间的不确定性, 有两种提高进度计划鲁棒性的方法得到了广泛研究: 鲁棒资源分配和插入时间缓冲。鲁棒资源分配主要依托“资源流网络(resource flow network)”来实现。资源流网络描述了随着项目的推进, 每一单位资源在各活动间的传递路线。给定一个进度计划, 项目执行时资源在活动之间不同的流动方式会对进度计划的鲁棒性产生影响。鲁棒资源分配方法就是为基线进度计划寻找一种巧妙的资源传递路线, 使得该计划在执行时具有较好的鲁棒性。Leus & Herroelen (2004)^[9]利用资源流网络研究了活动工期不确定条件下的鲁棒资源分配问题, 并采用分支定界算法进行求解。

将时间缓冲插入到进度计划中合适的位置, 可以尽可能地阻止局部干扰蔓延到整个进度计划。插入时间缓冲有两种策略: 锦标赛策略(即关键链法)和时刻表策略。关键链调度总是将活动的开始时间

尽可能早地开始。关键链调度是一种质量鲁棒的方法。时刻表策略不允许活动的实际开始时间早于其基线进度计划中开始时间, 如列车调度、航班调度。Van de Vonder et al. (2008)^[13]在活动工期随机、项目工期给定的条件下, 比较研究了多个以(6)式为目标构建鲁棒项目进度计划的启发式算法: RFDFFF(resource flow dependent float factor)、VADE(virtual activity duration extension、STC(starting time criticality)和禁忌搜索算法等。这些算法的思路, 都是先利用分支定界算法获得 RCPSP 的精确解(进度计划), 然后用这些启发式方法产生时间缓冲、并插入到项目进度计划中, 从而获得一个鲁棒的进度计划。仿真实验结果表明, 由于利用了活动权重、工期的方差等多种信息辅助缓冲分配, 基于时刻表策略的 STC 方法在几种启发式方法中表现最好。Tian & Demeulemeester (2013)^[16]通过大量计算实验研究了不同调度策略对项目绩效(平均工期、工期的标准差、及时完工概率和进度稳定性成本)的影响, 其结果表明, 对于较大规模的项目, 采用锦标赛策略和资源流网络进行调度会获得较好结果。

进度计划的鲁棒性, 通常是以牺牲项目工期为代价取得的, 即进度计划的鲁棒性越高, 导致项目的计划完工时间就会越长。Van de Vonder et al. (2005)^[17]和 Van de Vonder et al. (2006)^[18]分别在无资源约束和有资源约束的条件下, 比较了进度计划的鲁棒性与工期的权衡关系。进度计划的鲁棒性反映了解的鲁棒, 工期反映了质量鲁棒。Van de Vonder et al. (2005)^[17]采用了三种基于时间缓冲的启发式方法进行权衡分析: 关键链法、改进的关键链法和 ADFP(adapted float factor model)。前两种方法代表了解的鲁棒, ADFP 代表了质量鲁棒。研究表明, 对于某些类型的项目网络, 质量鲁棒与解的鲁棒方法在平均表现上并没有显著差异; 但多数情况下, 解的鲁棒方法产生鲁棒性所用的代价更

小, 而且也会在一定程度上带来质量鲁棒。针对资源受限项目, Van de Vonder et al. (2006)^[18]首先设计了 RFDFP 启发式方法, 来最大化解的鲁棒 (即实际项目开始时间与计划时间差异的加权和), 该方法用一种巧妙的方法将合适的时间缓冲分散在进度计划的各处, 并且用该方法插入缓冲后不会引起资源冲突, 从而使得进度计划在面对干扰事件时仍能表现出一定程度上的稳定性。作者将 RFDFP 与作为质量鲁棒代表的关键链方法进行对比, 通过仿真实验, 比较了进度计划的鲁棒性与工期之间的权衡关系。虽然关键链方法旨在保护项目的工期, 使其尽量按期完成, 但仿真结果表明, 在很多情况下关键链方法并非总是可以带来质量鲁棒。

Van de Vonder et al. (2007)^[19]以质量鲁棒和解鲁棒的复合目标函数, 通过实验评价了 3 种主动型资源受限项目调度算法的效果。这三种产生鲁棒的基线进度计划的算法为: (1) 产生质量鲁棒进度计划的精确算法: 基于分支定界算法^[20, 21]产生 RCPSPP 问题的最优解, 然后在进度计划的后面加入时间缓冲。(2) 产生质量鲁棒进度计划的近似最优算法: 基于优先规则的启发式算法, 利用 Late Start Time 优先规则, 结合串行进度生成机制, 产生基线进度计划, 然后在进度计划的后面加入时间缓冲。(3) 产生解的鲁棒进度计划的近似最优算法: 利用 RFDFP 算法产生时间缓冲, 将缓冲加入到 RCPSPP 问题最优解对应的进度计划中。实验表明, 该方法综合表现最好。

Hazır et al. (2010)^[22]研究了工期不确定条件下, 带有工期拖延惩罚、提前奖励的离散时间-成本权衡问题。作者建立随机规划模型, 在给定预算的条件下, 求解最大化利润和鲁棒的进度计划。Jaśkowski & Biruk (2011)^[23]将主动型调度方法应用于建筑项目, 以 (6) 式为目标, 基于仿真和数学规划的方法, 求解鲁棒的进度计划。

Deblaere et al. (2011)^[24]提出了一种新颖的主

动型调度方法, 称为“主动型调度策略”, 可以看作是鲁棒调度与随机调度在某种程度上结合。该主动型调度策略利用随机工期的分布信息, 以进度计划鲁棒性为目标, 求解一个动态的活动执行策略以及一个预测性的活动开始时间向量。作者在求解过程中采用了基于仿真的下降算法和基于报童问题的方法。

4.2.2 资源不确定条件下的调度

可恢复资源不确定条件下的主动型调度模型与方法, 可按照是否使用历史信息进一步细分。在项目计划阶段, 如果难以对项目执行情况做出预测, 可以使用代理鲁棒目标函数进行调度; 如果能够较准确预测未来事件或者能够根据历史信息统计出未来不确定事件发生的概率与后果, 调度时就可以将这些信息考虑进目标函数。

针对资源不确定性, Lambrechts et al. (2008)^[25]研究了资源供应量随机条件下的主动型调度问题。作者采用 (5) 式作为鲁棒性指标。因为该指标难于用解析方法评价, 而仿真方法又相当耗时, 所以作者提出了一个基于自由时差的效用函数作为代理目标函数:

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^n CIW_i \sum_{j=1}^{FS_i} e^{-j} \quad (8)$$

式中, i, j 为活动编号, FS_i 为考虑资源约束的活动 i 的自由时差, CIW_i 为活动 i 的累积不稳定权重, 定义为 $CIW_i = w_i + \sum_{j \in \text{succ}_i} w_j$, 其中: w_i 表示活动 i 的不稳定权重, succ_i 表示活动 i 的直接与间接后继活动集合。作者使用 CIW_i 的理由是, 活动 i 每延迟 1 个时间单位必然导致一个成本 w_i 的产生, 这一延迟同时也将导致活动 i 的后继活动均延迟 1 个时间单位。基于上述代理函数, 作者采用禁忌搜索算法来生成一个鲁棒的进度计划。

Lambrechts et al. (2008)^[26]提出了多种资源不

确定条件下的主动型调度方法: ① 基于 CIW 优先规则的启发式方法; ② 基于资源缓冲的方法 (在生成进度计划时, 以小于最大资源获得量的数值作为资源限制, 将资源不确定性转化为时间不确定性进行处理); ③ 基于时间缓冲的方法 (该方法既可单独使用, 也可与资源缓冲法结合)。在不确定资源的分布信息是可以获得的情况下, Lambrechts et al. (2011)^[27]基于概率论, 用解析方法分析了意外的资源短缺这一干扰事件对活动工期的影响, 基于资源缓冲方法, 将资源不确定性转化为时间不确定性。在此基础上, 比较了几种向进度计划插入时间缓冲以实现进度计划鲁棒的方法: 基于仿真的方法、基于代理目标函数的方法和 STC 方法。

4.2.3 基于模糊模型的调度

Wang (2004)^[28]基于模糊集理论研究产品开发项目调度, 不确定的时间参数用模糊集表示。作者把最坏情况下具有最佳性能的进度计划定义为鲁棒的进度计划, 在预先定义好项目交付日期的条件下, 最小化项目延期的可能性。张宏国等 (2009)^[29]采用模糊集对不精确时间参数和资源不确定性进行表示, 同时考虑进度计划的质量鲁棒和解的鲁棒性, 定义了基于时差的鲁棒性指标, 并设计遗传算法求解。王冰等 (2011)^[30]采用模糊数描述不确定的活动执行时间和项目交货期, 建立了以最大化客户满意度和进度计划鲁棒性为目标的鲁棒满意项目调度模型, 并用人工免疫算法求解。

4.3 基于鲁棒优化模型的主动型调度

虽然在某些情况下对未来可能出现的不确定场景进行预测是可行的, 但难以估计这些事件发生的概率, 这时概率模型就无法应用。这种情况下, 由于采用鲁棒优化方法处理不确定参数时, 主要是通过离散的场景集合或区间数对不确定参数建模, 概率分布函数不需要决策者提供, 使得鲁棒优化成为一种有效的解决手段。鲁棒优化以优化最坏场景下的性能为目标, 求出的进度计划即使在最坏情况

发生时仍具有较好的表现, 从而保证了进度计划的鲁棒性。

针对工期不确定性, Yamashita (2007)^[31]研究了活动时间不确定条件下的项目资源获得成本问题 (resource availability cost problem, RACP), 建立了两个鲁棒优化模型: 分别最小化 RACP 最大后悔值函数和最小化 RACP 均值-方差函数。针对 RACP 鲁棒优化模型的特点, 设计了分散搜索算法对问题求解。寿涌毅和王伟 (2009)^[32]提出活动工期不确定条件下的资源受限项目调度的鲁棒优化模型, 并采用遗传算法求解。实验结果表明, 他们的方法获得的进度计划能有效应对任务工期不确定性导致的随机差异, 具有较强的鲁棒性。Artigues et al. (2013)^[33]提出了 AR-RCPSP 问题 (minimax absolute-regret robust resource-constrained project scheduling problem), 基于整数规划求解各活动的最早开始执行策略 (ES-policy), 最小化所有场景下的最大绝对后悔值, 求解出的进度计划在活动工期出现最极端的情况下, 仍能尽量接近最优解。

项目时间-成本权衡是一类经典的项目调度问题, 鲁棒优化已在此类问题上出现了成功应用。Cohen (2007)^[34]用区间数对不确定的工期和成本建模, 基于鲁棒优化理论^[35], 建立线性时间成本权衡问题的鲁棒优化模型, 获取鲁棒的进度计划执行策略, 使得面对不确定的工期的任何一个场景, 都能保证项目按期完工。Hazır et al. (2011)^[36]假设活动工期、活动执行模式是确定的, 成本不确定。用区间数对成本的不确定性建模, 基于 Bertsimas & Sim (2003)^[37]的鲁棒离散优化框架, 采用混合整数规划对时间成本权衡中的“截止日期”问题建立了 3 个不同的优化模型, 并分别设计了基于 Benders 分解的精确算法和禁忌搜索启发式算法进行求解。Goh et al. (2010)^[38]基于 Bertsimas & Sim 的鲁棒离散优化框架, 研究了工期不确定条件下的赶工问题, 其目标是 minimize 项目拖期惩罚成本+赶工成本

的基础上, 并保证项目计划的稳定性。

5 响应型调度模型与方法

虽然通过主动型调度对基线进度计划进行了充分保护, 但也不可能考虑到所有的干扰因素, 项目执行时仍然存在进度计划受到干扰的可能, 即发生的干扰不能被基线进度计划完全“吸收”, 这时就需要使用响应型调度 (proactive scheduling, 国内也译作反应式调度) 对进度计划进行恢复, 以最小的代价尽快使项目进度回到预定轨道。响应型调度方法主要包括启发式方法、干扰管理、约束规划等。响应型调度可以看作是在项目执行过程中的一个多阶段决策过程, 采用多阶段决策的方法求解。相比主动型调度, 响应型调度的研究成果偏少。

在时间不确定条件下, Van de Vonder et al. (2007)^[39]提出了鲁棒响应型调度的启发式规则, 以及基于优先规则的鲁棒并行和鲁棒串行进度生成机制, 用于修补活动执行时受到干扰的进度计划, 使得基线进度计划与实际进度的偏差最小化。以质量鲁棒和解的鲁棒的复合函数作为目标函数, Van de Vonder et al. (2007)^[40]通过实验评价了进度计划由于干扰受到破坏时, 4种响应型资源受限项目调度算法的效果: ① 最优的质量鲁棒算法: 基于重调度, 即在干扰发生的时刻, 调用最优算法完成重调度, 再次生成一个最优的进度计划。② 质量鲁棒的启发式方法: 基于最早开始调度策略 (early start policy)。③ 质量鲁棒的启发式方法: 基于活动的优先规则 (Activity-based priority rules)。④ 解的鲁棒启发式方法。基于最小化提前-拖期成本, 通过求解 RCPSPWET 问题 (resource-constrained earliness-tardiness project scheduling problem) 的最优解获得进度计划。

Deblaere et al. (2007)^[41]研究了工期不确定条件下的响应型调度策略, 基于资源流网络, 以最小化 (6) 式为目标, 建立了向基线进度计划中的活动分配资源的鲁棒方法。作者提出了 3 种基于整数

规划的资源分配启发式算法 (MinEA, MaxPF, MinED) 和一种构造式算法 MABO (myopic activity-based optimization)。作者还推导出了进度计划的稳定性成本的下界。卢睿和李林瑛 (2011)^[42]研究了随机环境中资源受限项目调度中的加权提前-拖期惩罚问题, 用基于迭代局部搜索的启发式方法求解, 并将该方法应用于响应型调度过程。张沙清等人 (2010; 2011)^[43, 44]分别研究了模具多项目中任务拖期、可再生资源故障这两类不同干扰下的响应型调度问题, 并采用粒子群算法求解。

针对资源不确定性, 为了使执行过程中因资源短缺而受干扰的进度计划及时恢复可行, 同时最小化计划变更产生的代价, Lambrechts et al. (2008)^[45]提出了两种响应型调度方法: 基于已调度顺序列表 (scheduled order list) 的启发式算法和禁忌搜索算法。在活动工期、成本多种不确定条件下, Deblaere et al. (2011)^[46]研究了多种执行模式 RCPSP (MRCPSP) 的响应型调度问题。项目按给定的基线进度计划执行时, 若资源或工期受到干扰 (影响), 分别设计了改进的分支定界精确算法和禁忌搜索启发式算法, 获得一个修补后的进度计划, 最小化进度偏离成本与模式切换成本之和。

Zhu et al. (2005; 2007)^[47, 48]的研究基于干扰管理, 其模型可以对活动网络结构、时间、资源等多种干扰进行处理。Zhu et al. (2005)^[47]研究了资源受限项目的进度计划在执行过程中受到干扰后, 如何以最小的惩罚成本恢复到原计划的问题。作者将惩罚成本定义为基线进度计划偏离程度的函数。将问题转化为整数线性规划问题, 并采用混合整数规划和约束规划相结合的方法求解, 从而有效解决进度计划被干扰后的恢复问题。Zhu et al. (2007)^[48]研究了随机工期条件下的时间/成本权衡问题, 建立了两阶段随机整数规划模型, 求解不易受到干扰的项目交付日期; 对受到干扰的进度计划, 以最小的代价对其修复, 作者将其转换为最小网络费用流

问题, 进而用精确方法求解。

Wang (2005)^[49]建立了项目调度对应的动态约束满足问题 (constraint satisfaction problem), 项目交付日期作为必须满足硬约束。该方法可以对以下干扰事件进行处理: ① 活动开始或结束时间发生变化; ② 活动工期变化; ③ 资源可用量变化; ④ 时间约束的增删。项目执行时, 所有干扰事件对进度计划的影响都可以归结为 CSP 中的约束的增加或删除。分别用模拟退火和 GA 对受到干扰的进度计划进行修补, 修补的目标函数是最小化资源冲突成本。

6 研究展望

作为运筹学、管理科学、工业与系统工程等学科的一个新兴研究方向, 鲁棒项目调度以其重要的理论与实践价值, 受到了广泛重视。经过十余年的发展, 鲁棒项目调度已经取得了许多重要的成果, 本文着重对近几年最新的成果进行了综述。可以发现, 鲁棒项目调度未来的研究依然存在广阔的发展空间, 归纳为如下几个方面:

(1) 在模型方面, 建立面向多种不确定因素的鲁棒项目调度模型。现有研究主要关注了时间或资源的不确定性^[50], 然而在实际项目中, 还存在其他方面的不确定, 如项目范围变更 (新活动的加入或旧活动的取消), 活动优先关系不确定 (活动返工、迭代) 等, 需要进一步探索新的模型与方法来处理这些问题。利用设计结构矩阵或图示评审技术来描述这些新的不确定性, 将是一个非常值得探讨的课题。此外, 现有研究倾向于对各类不确定因素独立研究, 这显然具有一定的局限性, 如何在同时面临多种不确定因素的条件下建立鲁棒调度模型, 需要进一步深入研究。

在鲁棒项目调度模型中, 不可避免地要对进度计划的鲁棒性进行评价。现有的鲁棒项目调度主要以最大化解的鲁棒与质量鲁棒为主, 其所用的鲁棒性指标大多数是关于时间的函数, 如基于时差、加

权的活动开始时间变动或项目及时完工的概率^[51]。提出新的、有效的鲁棒性指标, 将会进一步推进鲁棒项目调度的建模。

(2) 在算法方面, 由于鲁棒项目调度问题的复杂性很高, 开发各类高效的精确或次最优算法, 仍然是非常值得关注的研究方向。现有的主动型/响应型调度方法, 很多都遵循 Demeulemeester & Herroelen^[2]的三阶段过程生成鲁棒基线进度计划, 有必要探索更为简化的方法。

另外, 基于鲁棒优化的方法, 虽然可以直接生成鲁棒的基线进度计划, 但仍有不足: 一方面, 此类研究仍处于起步阶段, 成果仍然偏少, 有待于进一步深入; 另一方面, 鲁棒优化主要用于主动型调度, 如何将响应型调度与其结合, 对其生成的鲁棒计划辅以配套的响应型调度策略, 这一方面的研究仍然缺乏。

(3) 在与其他研究方向集成方面, 项目风险与鲁棒项目调度的集成研究值得期待。不确定性总是伴随着风险, 未来的研究需要在项目风险评估与鲁棒调度方面进一步扩展与集成。不确定环境下的鲁棒项目调度, 有必要考虑项目风险对鲁棒调度的结果与调度过程产生的影响, 这将进一步扩展研究视角, 增强实践价值。

(4) 在应用方面, 由于鲁棒项目调度研究起步较晚, 现有的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鲁棒项目调度问题, 加强理论上具有良好表现的模型与算法的推广应用。

参考文献

- [1] Demeulemeester E, Herroelen W. Project scheduling. A research handbook[M], Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] Demeulemeester E, Herroelen W. Robust Project Scheduling[J]. Foundations and Trends® in Technology,

- Information and OM, 2009, 3(3-4): 201-376.
- [3] Herroelen W, Leus R. Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures[J]. *International Journal of Production Research*, 2004, 42(8): 1599 - 1620.
- [4] Herroelen W, Leus R. Project scheduling under uncertainty, survey and research potentials[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 165(2): 289 - 306.
- [5] Blazewicz J, Lenstra J K, Rinnooy Kan A H G. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1983, 5(1): 11-24.
- [6] Leus R, Herroelen W. The complexity of machine scheduling for stability with a single disrupted job[J]. *Operations Research Letters*, 2005, 33(2): 151-156.
- [7] 田文迪. 随机 DTRTP 环境下项目调度策略的比较研究 [D]. 博士学位论文, 华中科技大学, 2011.
- [8] 王勇胜, 梁昌勇. 资源约束项目调度鲁棒性研究的现状与展望[J]. *中国科技论坛*, 2009 (8): 95-99.
- [9] Leus R, Herroelen W. Stability and resource allocation in project planning[J]. *IIE Transactions*, 2004, 36(7): 667-682.
- [10] Al-Fawzan M A, Mohamed H. A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling[J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 96(2): 175-187.
- [11] 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.
- [12] Kobylanski P, Kuchta D. A note on the paper by M. A. 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.
- [13] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(3): 723-733.
- [14] 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.
- [15] Herroelen W, Leus R. The construction of stable project baseline schedules[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(3): 550-565.
- [16] Tian W, Demeulemeester E. On the interaction between roadrunner or railway scheduling and priority lists or resource flow networks[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2013, 25(1-2): 145-174.
- [17] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W, Leus R. 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.
- [18] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W, Leus R. The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling[J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44(2): 215-236.
- [19] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W. A classification of predictive-reactive project scheduling procedures[J]. *Journal of Scheduling*, 2007, 10(3): 195-207.
- [20] Demeulemeester E, Herroelen W. A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem[J] *Management Science*, 1992, 38(2): 1803-1818.
- [21] Demeulemeester E, Herroelen W. New benchmark results for the resource-constrained project scheduling problem[J]. *Management Science*, 1997, 43(11): 1485-1492.
- [22] 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.
- [23] Jaśkowski P, Biruk, S. The method for improving stability of construction project schedules through buffer allocation[J]. *Technological and Economic Development of Economy*, 2011, 17(3): 429-444.
- [24] Deblaere F, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 214(2): 308-316.
- [25] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 111(2): 493-508.
- [26] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive and reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities[J]. *Journal of Scheduling*, 2008, 11(2): 121-136.
- [27] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. Time

- slack-based techniques for robust project scheduling subject to resource uncertainty[J]. *Annals of Operations Research*, 2011, 186(1): 443-464.
- [28] Wang J. A fuzzy robust scheduling approach for product development projects[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 152(1): 180-194.
- [29] 张宏国, 徐晓飞, 战德臣, 等. 不确定资源约束下项目鲁棒性调度算法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(6): 2079-2082.
- [30] 王冰, 李巧云, 尹磊, 等. 基于人工免疫算法的鲁棒满意项目调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(5): 1089-1095.
- [31] Yamashita D S, Armentano V A, Laguna M. Robust optimization models for project scheduling with resource availability cost[J]. *Journal of Scheduling*, 2007, 10(1): 67-76.
- [32] 寿涌毅, 王伟. 基于鲁棒优化模型的项目调度策略遗传算法[J]. *管理工程学报*, 2009, 23(4): 148-152.
- [33] Artigues C, Leus R, Talla Nobibon F. Robust optimization for resource-constrained project scheduling with uncertain activity durations[J]. *Flexible Services and Manufacturing*, 2013, 25(1-2): 175-205.
- [34] Cohen I, Golany B, Shtub A. The Stochastic Time-Cost Tradeoff Problem: A Robust Optimization Approach[J]. *Networks*, 2007, 49(2): 175-188.
- [35] Ben-Tal A, Goryashko A, Guslitzer E, et al. Adjustable robust solutions of uncertain linear programs[J]. *Mathematical Programming*, 2004, 99(2): 351-376.
- [36] Hazır Ö, Erel E, Günalay Y. Robust optimization models for the discrete time/cost trade-off problem[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 130(1): 87-95.
- [37] Bertsimas D, Sim M. Robust discrete optimization and network flows[J]. *Mathematical Programming* 2003, 98(1-3): 49-71.
- [38] Goh J, Hall N G, Sim M. Robust optimization strategies for total cost control in project management. Stanford University, working paper, 2010.
- [39] Van de Vonder S, Ballestín F, Demeulemeester E, et al. Heuristic procedures for reactive project scheduling[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, 52(1): 11-28.
- [40] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W. A classification of predictive-reactive project scheduling procedures[J]. *Journal of Scheduling*, 2007, 10(3): 195-207.
- [41] Deblaere F, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. Robust Resource Allocation Decisions in Resource-Constrained Projects[J]. *Decision Sciences*, 2007, 38(1): 5-37.
- [42] 卢睿, 李林瑛. 一种求解反应式项目调度问题的启发式方法[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(2): 245-251.
- [43] 张沙清, 陈新度, 陈庆新, 等. 资源不确定环境下模具多项目预测-反应式调度算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(12): 2688-2696.
- [44] 张沙清, 陈新度, 陈庆新, 等. 基于优化资源流约束的模具多项目反应调度算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(8): 1571-1580.
- [45] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules[J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 111(2): 493-508.
- [46] Deblaere F, Demeulemeester E, Herroelen W. Reactive scheduling in the multi-mode RCPSP[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1): 63-74.
- [47] Zhu G, Bard J F, Yu G. Disruption management for resource-constraint project scheduling[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2005, 56(4): 365-381.
- [48] Zhu G, Bard J F, Yu G. A two-stage stochastic programming approach for project planning with uncertain activity durations[J]. *Journal of Scheduling*, 2007, 10(3): 167-180.
- [49] Wang J. Constraint-based schedule repair for product development projects with time-limited constraints[J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 95(3): 399-414.
- [50] 何正文, 刘人境, 徐渝. 基于随机活动工期的资源约束项目鲁棒性调度优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(3): 650-659.
- [51] 崔南方, 赵雁, 胡雪君. 鲁棒性项目调度中缓冲设置方法研究[J]. *控制与决策*, 2013, (已录用), <http://www.kzyjc.net:8080/CN/abstract/abstract12556.shtml>.